

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja Maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Eesti nelja suurima linna maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine aastaks 2030**

**Piia Kirsimäe**

Juhendaja: PhD Evelyn Uuemaa

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2017

## **Eesti nelja suurima linna maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine aastaks 2030**

**Lühikokkuvõte:** Käesoleva magistritööga analüüsiti linnade kasvu ja maakasutusmuutusi neljas Eesti suurimas linnas kasutades Landsat satelliidipilte aastatest 1989, 2007 ja 2016. Klassifitseeritud maakasutuskaartide tegemiseks kasutati näidistega klassifitseerimist ning nende põhjal koostati prognoos aastaks 2030. Vaid looduslikke tegureid kaasav prognoosi mudel põhines neurovõrgul ja Markovi ahelatel. Uuringuperioodil on kõigis linnalähipiirkondades näha kiiret asulaalade kasvu ning prognoosi kohaselt jätkub kõigis linnades asulaalade laienemine, olles kontsentreeritud juba olemasoleva asutuse ja teede lähedusse. Maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine võimaldavad paremini mõista ajaloolist, tänapäevast ning tuleviku maakasutusmuutuste mustreid, aidates planeerijatel välja töötada säästvat arengut tagavaid meetmeid ja tegevuskavasid.

**Märksõnad:** linnade maakasutusmuutuste tuvastamine, *Land Change Modeler*, linnade kasvu modelleerimine, linnade kasvumustrid, neurovõrgud, Markovi ahel

**CERCS:** P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

## **Land cover changes analysis and modelling for 2030 in Estonia's four largest cities**

**Abstract:** This Master Thesis analyses the urban growth and land cover changes in four Estonia's largest cities using Landsat images from the years 1989, 2007 and 2016. The classification was carried out using supervised classification method to create land cover maps. The classified images were used to predict the land cover changes for 2030. The simulation model integrated the neural networks and Markov chain methods. The results indicated that all the cities showed a fast urban growth between 1989–2016 and the predicted results showed that urban expansion is likely to continue near pre-existing development and roads. Land cover change analysis and modelling provides a better understanding of the past, current and future patterns of land cover changes helping planners to develop sustainable development policies.

**Keywords:** urban change detection, *Land Change Modeler*, urban growth modeling, urban spatial patterns, Landsat, neural networks, Markov chain

**CERCS:** P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 TEOORIA .....	7
1.1 Maakasutuse modelleerimine .....	7
1.1.1 Tarkvara Land Change Modeler .....	10
1.1.2 Markovi ahel .....	11
1.1.3 Neurovõrk.....	12
1.2 Eesti valglinnastumine peale taasiseseisvumist.....	13
1.3 Hüpoteesid.....	16
2 ANDMED JA METOODIKA .....	18
2.1 Uurimisalad ja andmed.....	18
2.1.1 Satelliidipiltide eeltöötlus ja klassifitseerimine.....	20
2.1.2 Tegurid .....	23
2.1.3 Analüüsi ja modelleerimise metoodika .....	24
3 TULEMUSED .....	29
3.1 Tallinn.....	29
3.1.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine .....	29
3.1.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2015.....	31
3.1.3 Maakasutusmuutuste modelleerimine .....	32
3.2 Tartu.....	35
3.2.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine .....	35
3.2.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2016.....	37
3.2.3 Maakasutusmuutuste modelleerimine .....	38
3.3 Pärnu.....	41
3.3.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine .....	41
3.3.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2016.....	43

3.3.3	Maakasutusmuutuste modelleerimine .....	44
3.4	Narva .....	48
3.4.1	Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine .....	48
3.4.2	Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2015.....	50
3.4.3	Maakasutusmuutuste modelleerimine .....	51
4	ARUTELU JA JÄRELDUSED .....	55
	KOKKUVÕTE.....	61
	Summary .....	63
	TÄNUAVALDUSED .....	65
	KASUTATUD KIRJANDUS .....	66
	LISAD .....	70

## SISSEJUHATUS

Suur osa maailma elanikkonnast on asunud elama linnadesse, et otsida paremaid töövõimalusi, kvaliteetsemaid teenuseid ning paremaid elutingimusi. Prognooside kohaselt on selline demograafiline üleminek pidevas kasvumises. 1950. aastal elas 30% maailma rahvastikust linnades, 2014. aastal elas juba rohkem kui pool rahvastikust (54%) linnades ning 2050. aastaks prognoositakse, et linnades elab juba 66% kogu maailma rahvastikust (United Nations 2014). Samas soovib üha enam perekondi omada eramaja ning tihti eelistatakse linna piiril olevaid uusarendusi, sest linnakeskused on täis ehitatud. Seetõttu kasvavad linnad pindalaliselt kiiremini kui kasvab linnade elanikkond (Tewolde, Cabral 2011). Paljud linnad on aga ümbritsetud viljakatest põllumaadest ja bioloogiliselt mitmekesistest aladest (Rosa *et al.* 2014), seetõttu on väga oluline tähelepanu pöörata sellele, kuidas ja kuhu linnad laienevad. Lähimõtlematu ja kiire linnade kasvamine toob endaga tihti kaasa halvasti planeeritud infrastruktuuri ning olemasolevate planeeringute eiramise, mis ähvardab linnade säästvat arengut (United Nations 2014). See võib viia mitmete majanduslike, sotsiaalsete ja keskkonnavalaste probleemide tekkimiseni nagu bioloogilise mitmekesisuse vähenemine, elupaikade killustumine, viljakate põllumaadade vähenemine, saastatuse suurenemine, metsade hävimine jne (Tian *et al.* 2016, Palang 1998, United Nations 2014). Suur põllumajandusliku maa muutumine linnamaaks on tekitanud tohutu surve põllumajandusmaa ressurssidele ning toodangule (Tian *et al.* 2016).

Rahvastiku suurenemine ja linnastumine on ühed kõige keerulisemad protsessid, sest need hõlmavad endas muutusi maakasutuses ja taimestik- nii kohalikul, regionaalsel kui ka globaalsel tasemel. Kuigi linnad katavad kõigest 2% kogu planeedi pinnast, on nad oluliselt muutnud looduslikku maastikku (Prieto-Amparán *et al.* 2016). Valglinnastumise analüüsimine ja modelleerimine omavad olulist rolli linnade säästva arengu tagamisel (Tewolde, Cabral 2011). Linnades toodetakse 78% kasvuhoonegaasidest, aidates sellega oluliselt kaasa ülemaailmsele kliimamuutustele (Prieto-Amparán *et al.* 2016). Seetõttu on väga oluline mõista linnapiirkondade kasvudünaamikat, et oleks võimalik välja töötada paremaid ja keskkonnasõbralikumaid linnade kasvuplaane ning võtta tarvitusele meetmeid loodusvarade säilimiseks (Prieto-Amparán *et al.* 2016, Palang 1998).

Linn on elav nähtus, kus ühiskondlik surve, majanduslik ja poliitiline vastasmõju garanteerivad pideva muutumise ja kasvu. Linna muutuste protsessi juhivad demograafiline ja majanduslik

kasv, samuti poliitika, mis on omakorda mõjutatud kaubanduse-, tööstuse- ja teenuste kättesaadavusest (Godoy, Soares-Filho 2008).

Antud magistritööl on kaks eesmärki. Esiteks leida nelja Eesti suurlinna peamised maakasutusmuutused keskendudes muutuste koguste ja asukoha leidmisele, mitte põhjustele ja tagajärgedele. Teiseks, teha kindlaks, kas looduslikel teguritel, neurovõrgul ja Markovi ahelal põhinev mudel suudab luua Eesti linnade kasvu kohta usaldusväärseid mudeleid. Eesmärkide täitmiseks uuriti maakasutusmuutusi Eesti neljas suurimas linnas (Tallinn, Tartu, Pärnu, Narva) aastatel 1989–2016, kasutades kolmest erinevast perioodist pärit satelliidipilte. Modelleerimine tehti aastaks 2016 perioodil 1989–2007 ning aastaks 2030 perioodil 2007–2016 toimunud üleminekute ja muutuste kohta, kasutades neurovõrgul ja Markovi ahelal põhinevat mudelit. Kasutatud programmi ja mooduli valikul sai otsustavaks kompaktsus ning kasutajamugavus. Moodulisse on sisse ehitatud enamik tööks vajalikke funktsioone. Uurimisalade valikul sai otsustavaks nende kasvu kiirus, paiknemine ja kasvu suunavate tõukejõudude erinevus. Eesti nelja suurima linna seas on nii kiirekasvulisi kui ka neid, kus kasv on olnud pigem tagasihoidlik. Samuti on asukohast tulenevalt nende tõukejõud erinevad, näiteks sisemaal asuva linna puhul ei saa tegurina välja tuua ranniku mõju.

Maakasutusmuutused on toimunud kogu aeg ja toimuvad ka edaspidi, tegemist ei ole protsessiga, mida oleks võimalik täielikult peatada. Küll aga on võimalik maakasutuse modelleerimisega läbi mängida linnaplaneerimise erinevaid stsenaariume ning leida looduslikule keskkonnale kõige vähem kahju tegev variant. Modelleerimine võimaldab identifitseerida erinevate variantide positiivsed ja negatiivsed aspektid. Teades Eesti suurlinnade praegust ja prognoositavat asulaalade olukorda, on võimalik kohandada olemasolevaid plaane ning nendest lähtuvalt arendada uusi.

Magistritöö on jagatud neljaks peatükiks. Esimene sisaldab teoreetilist ülevaadet modelleerimisest, eelnevalt läbi viidud uuringutest nii välismaal kui Eestis, kasutatavast programmist ning Markovi ahelatest. Teises peatükis kirjeldatakse töö lähteandmeid ning ajaloolise maakasutus muutuste leidmiseks ja prognoosimiseks kasutatud meetodikat. Kolmandas peatükis tuuakse linnade kaupa välja olulisemad analüüsi tulemused ning tehtud prognoosid. Neljandas peatükis on toodud järeldused ja arutelu tähtsamate tulemuste kohta.

# 1 TEOORIA

## 1.1 Maakasutuse modelleerimine

Maakasutuse modelleerimine on protsess, kus eelnevalt kogutud info põhjal tehakse prognoose tulevikuks, et paremini mõista maakasutusmuutuste võtmeprotsesse (Veldkamp, Lambin 2001). Tegemist on olulise meetodiga maakasutuse alternatiivsete stsenaariumide välja töötamiseks. See võimaldab läbi viia arvutuslike eksperimente, mõistmaks maakasutuse ja maakatte muutuste erinevate mõjutajate olulisust ning seeläbi protsessi toimimist mingis kindlas piirkonnas (Perez-Vega *et al.* 2012). Maakasutuse ja maakatte muutuste modelleerimine on oluline lähenemine hindamaks ülemaailmsel bioloogilise mitmekesisuse vähenemist, mis on tingitud paljudest loodus- ja inimteguritest (Perez-Vega *et al.* 2012, Rosa *et al.* 2014).

Enne modelleerimist tuleb aga selgeks teha mida uuritakse, kas maakasutuse või maakatte muutusi. Tihti kasutatakse neid mõisteid sünonüümidenä, kuid vahetegemine on siiski oluline, sest see mõjutab nõudeid andmete kalibreerimiseks ja kontrolliks. Alati ei ole nende vahel ka üks-ühele suhet. Maakasutusmuutused määratleb inimtegevus aga maakatte muutused toimuvad ka ilma inimese mõjuta (Brown *et al.* 2004).

Maakasutuse ja maakatte muutuste modelleerimisel kasutatakse enamasti ajaloolisi kaarte ning lisaks sobivus- või üleminekukaarte, mis põhinevad eelnevalt kogutud infol. Selle info saamiseks tuleb enne modelleerimist viia läbi maakasutuse ja maakatte ajalooliste muutuste analüüs. Selliseid analüüse on tehtud juba aastaid, kuid satelliidipiltide ja GIS tehnoloogia areng on viinud selle täiesti uuele tasemele. Kaugseire tehnoloogia ja tasuta või väga odavalt kättesaadavad satelliidipildid on oluliselt suurendanud linnade kasvu, maastiku dünaamika, maastiku struktuuri ja linnastumise protsesside uurimist (Tewolde, Cabral 2011).

Mudeleid kasutatakse erinevates valdkondades, et paremini mõista süsteemide dünaamikat, arendada empiirilist kontrollitavaid hüpoteese ja teha prognoose ja/või hinnata võimalikke arengustsenaariumeid (Brown *et al.* 2004). Maakasutusmuutuste mudelid esindavad vaid ühte osa keerukast maakasutuse süsteemist, nad võimaldavad testida maakasutusmuutuste tundlikust teatud muutujate suhtes. Viimase aastakümne jooksul on välja töötatud palju erinevaid maakasutuse ja maakatte muutuste mudeleid, et oleks võimalik üha paremini hinnata ja prognoosida maakasutuse ja maakatte muutuste rolli Maa ökosüsteemi arengule (Perez-Vega *et al.* 2012, Veldkamp, Lambin 2001, Rosa *et al.* 2014). Kirjanduses kirjeldatakse sadu erinevaid maakasutuse ja maakatte muutuste mudeleid, mis käsitlevad maastikuökoloogiat,

geograafiat, linnaplaneerimist, majandust, regionaalteadust, infotehnoloogiat, GIS ja muid valdkondi. Kõik need mudelid omavad erinevaid eesmärgi, metoodilisi lähenemisi ja andmete kättesaadavust (Brown *et al.* 2004). Kuigi ükski mudel ei küündi reaalsuseni, annavad need siiski võimaluse koguda väärtuslikku teavet süsteemi käitumise kohta erinevatel tingimustel (Veldkamp, Lambin 2001, Rosa *et al.* 2014).

Antud magistritöös tegeletakse maakasutusmuutuste, täpsemalt linna arengu dünaamika analüüsi ja modelleerimisega programmiga IDRISI. Linnastumine on maakasutusmuutuste üks kriitilisemaid protsesse ja dramaatilisemaid vorme (Tian *et al.* 2016). Modelleerimine ei ole veel linnaplaneerimises suurt kasutust leidnud, kuid erinevate modelleerimisvahendite kättesaadavus pakub ühe uusi ning paremaid võimalusi linnaplaneerijatele. Tegemist on efektiivse vahendiga planeerimisotsuste toetamiseks, arvestades asjaoluga, et linn on pidevas muutumises (Godoy, Soares-Filho 2008). Linnade laienemise aegruumilise dünaamika uurimine on oluline linnade säästva arengu tagamisel (Tian *et al.* 2016).

IDRISI omab kahte laialt kasutatavat moodulit modelleerimise läbiviimiseks- *CA\_MARKOV* ja *Land Change Modeler (LCM)*. *CA\_MARKOV* kasutatakse maakasutusmuutuste ja nende mõju hindamiseks ning modelleerimiseks. Tuleviku modelleerimiseks on aga esmalt vaja mõista linnade kasvu dünaamikat ning selleks analüüsitakse viimaste aastate maakasutust. *CA\_MARKOV* moodul ei võimalda seda teha, küll aga on see võimalus sisse ehitatud moodulisse *LCM* (Eastman 2012). Nii *CA\_MARKOV* kui ka *LCM* omavad mõningaid piiranguid. Mudelid ei suuda integreerida sotsiaalmajanduslikke andmeid, nagu elanikkonna kasv, sotsiaalne nõudlus, poliitilised otsused, maaomanike valmisolek oma maad müüa või maakasutust puudutavate poliitikate muutus uuringute perioodil (Prieto-Amparán *et al.* 2016). Samuti omavad nad erinevaid piiranguid lähteandmetele (Eastman 2012).

Prieto-Amparán *et al.* (2016) läbi viidud uuringus vaadeldi maakatte üldist muutumist Mehhiko Chihuahua linnas aastatel 1989-2014 ning ennustus tehti aastaks 2024. Kasutati Landsat TM ja OLI pilte ning IDRISI moodulit *CA\_MARKOV*. Antud uuringus kasutati satelliidipilte aastatest 1989, 1999, 2009 ja 2014. Satelliidipiltide klassifitseerimine viidi läbi kasutades programmi ERDAS ning täpsused saadi vastavalt 87%, 95%, 91% ja 82%. Sobivuskaartidena kasutati kõrgusmudelit, kaugust jõgedest ja teedest. Antud juhul eeldati, et tegurid on ajas muutumatud ehk staatilised. Ajaloolise maakasutuse analüüsi tulemustest selgus, et enim on kasvanud just asulaalade pindala, mis 25 aastaga peaaegu kahekordistus. Kuna tegemist on mägise piirkonnaga siis asula laienes vaid madalamatele aladele ning põhiliselt põllu- ja rohumaaale. Mudelite täpsuse hindamiseks tehti esimene modelleerimine aastaks, mille kohta oli olemas



tegelik maakasutuse kaart. Tegelik ja modelleeritud maakasutuse vaheline erinevus oli väga väike. Üldiseks täpsuseks saadi 90% ning kõige täpsemalt modelleeriti metsa alade kategooria, kus täpsus oli 99%. Pikaajalise prognoosi kohaselt jätkub põllu- ja rohumaa kiire vähenemine ning enim laieneb asulaala.

Henriquez *et al.* (2006) vaatlesid aga uuringus kahte keskmise suurusega Tšiili linna- Chillan ja Los Angeles. Antud uuringus jaoks digiteeriti 1978., 1991., 1992. ja 1998. aasta paberkaardid. Modelleerimine viidi sarnaselt eelneva näitega läbi mooduliga *CA\_MARKOV*. Tegelik ja modelleeritud maakasutuskaartide vaheliseks täpsuseks saadi 88% ja 77%, mida peeti piisavaks, et teha pikaajaline prognoos. Tulemustest selgus, et aastatel 1978–1998 on Chillan kasvanud 45,5% ja Los Angeles 133,45%. Lisaks uuriti ka maakasutusmuutuse vastavust linnaplaneeringule ning avastati, et Chillanis on 4,5% ja Los Angeleses 43,8% uuselamutest on rajatud väljapoole linnaplaneeringuga lubatud alasid. Põhiliselt on kasvanud asulaalad ning metsad (istandused) põllumaade arvelt. Kõige kiiremini vähenesidki just põllumajandusmaad. Analüüsist selgus, et kaugus linnakeskusest ei ole niivõrd oluline kui seda on kaugus suurematest teedest. See on aga põhjustanud väga killustunud linna arengu.

Tewolde ja Cabral (2011) tehtud uuring keskendus Kesk-Aafrika Eritrea pealinnas Asmaras tehtud valglinnastumise analüüsile ja modelleerimisele mooduliga *LCM*. Kasutati 1989., 2000. ja 2009. aasta satelliidipilte, mis klassifitseeriti kasutades eCognition Developer 8 programmi ning piltide täpsuseks saadi 85,9%. *LCMi* kasutati linna kasvu mudeli ülesehitamiseks ning ajalooliste maakasutusmuutuste analüüsimiseks. Üleminekukaartide tegemisel kasutati neurovõrkude meetodit ning modelleerimiseks Markovi ahelaid. Prognoosimisel kasutati 1989. ja 2009. aasta kaarte. Enne tegelikku modelleerimist tehti mudeli katsetus 1989. ja 2000. aasta kaartidega ning saadi ennustus aastaks 2009. Tegelik ja modelleeritud maakasutuskaardi vaheliseks täpsuseks saadi 85,9%. Uuringust selgus, et aastatel 1989-2009 on linna pindala peaaegu kolmekordistunud kasvades 4441 hektari võrra. Aastaks 2020 ennustatakse veel 25% kasvu ehk 1484 hektarit.

Perez-Vega *et al.* (2012) võrdlesid oma töös kahte erinevat mudelit *DINAMICA*t, mis kasutab kaalude meetodit ja *LCMi*, mis kasutab neurovõrkude meetodit. Algandmetena kasutati digiteeritud kaarte ja ortofotosid. Tulemustest selgus, et *LCMi*ga tehtud üldine üleminekupotentsiaali kaart on täpsem, kui *DINAMICA*ga tehtud, sest neurovõrkude meetod võimaldab muutusi väljendada adekvaatsemalt kui kaalude meetodilt üksikute tõenäosuste saamisel.

Eesti on nii ajaloolisi maakasutuse muutusi uuritud kui ka prognoose tehtud päris palju ning siinkohal tuuakse ära vaid väike osa tehtud töödest. Aaviksoo (1993) uuris on doktoritöös põhjalikult 1. ja 2. järku Markovi mudeleid. Oma doktoritöös uuris Palang (1998) Eesti maastiku muutusi 20. sajandil ning esitas tuleviku prognoose. Peterson ja Aunap (1998) on uurinud põllumajandusliku maakasutuse muutusi Eestis 1990-ndatel kaugseireandmeid kasutades. Sepp (2002, 2004) uuris oma keskastme- ja bakalaureusetöös rakk-automaadi ja Markovi ahelate kasutamist maakasutuse modelleerimisel. Poska *et al.* (2007) tegid põhinedes õietolmu analüüsil, kasutades *CA\_MARKOVI* analüüsi meetodit maakatte muutuste rekonstruktsiooni. Sisas (2008) uuris maakasutusmuutuseid Eestis perioodil 1900-2000 ning modelleeris kasutades rakk-automaadil ja Markovi ahelatel põhineva mudeliga prognoosi aastaks 2050.

### ***1.1.1 Tarkvara Land Change Modeler***

*Land Change Modeler* (LCM) on maakasutuse planeerimist ja otsustusi toetav süsteem, mis on välja arendatud USA Clarki ülikooli geograafide poolt. Algselt oli see kättesaadav vaid programmis IDRISI, kuid 2007. aastal loodi võimalus mooduli kasutamiseks ka koos tarkvaraga ArcGIS. Siinkohal tuleb aga arvestada, et süsteem töötab siiski vaid IDRISI rasterformaatidega (Roosaare 2009). *LCM* võimaldab analüüsida ning prognoosida erinevaid maakasutusmuutusi ja hinnata nende muutuste ökoloogilist mõju (Clarks Labs 2015). Moodul *LCM* koondab endasse erinevad IDRISI töövahendid ja abiinfo, et neid oleks võimalik kiiresti kasutada (Roosaare 2009). Mooduli ülesehitusel on olulisel kohal kasutajasõbralikkus (Clarks Labs 2015), mis võimaldab kasutajal teha valikuid samm-sammult ning kogu protsess on jaotatud kaustadesse ja kergesti korratav (Roosaare 2009).

*LCMi* puhul on tegemist väga mitmekülgse mooduliga, mis võimaldab teha väga palju erinevaid operatsioone:

- Maakasutusmuutuste ja trendide kaardistamine
- Tuleviku maakasutusmuutuste stsenaariumide modelleerimine
- Liikidele ja elupaikadele maakasutusmuutuste mõju hindamine
- Liikide paiknemise ja bioloogilise mitmekesisuse modelleerimine
- Metsade hävinemisest tuleneva süsiniku heitekoguse hindamine REDD analüüsiga
- Rohekoridoride stsenaariumite loomine

- Kaitsealade stsenaariumite loomine (Clarks Labs 2015).

Antud magistritöös kasutatakse *LCMi* kahte esimest tööfunktsiooni- maakasutusmuutuste analüüsi ning tuleviku stsenaariumide modelleerimist. Maakasutusmuutuste analüüs põhineb kahe ajaloolise maakasutuskaardi võrdlemisel, luuakse graafikud ning kaardid toimunud muutuste kohta (TerrSet 2016). Leitakse, millistes kategooriates on muutused toimunud ning mis võiksid olla nende liikumapanevateks jõududeks (Roosaare 2009). Muutuste modelleerimine põhineb neurovõrkudel ja Markovi ahelal ning aluseks võetakse ajaloolised maakasutuskaardid ja kindlaks määratud tegurid (Eastman 2012).

### **1.1.2 Markovi ahel**

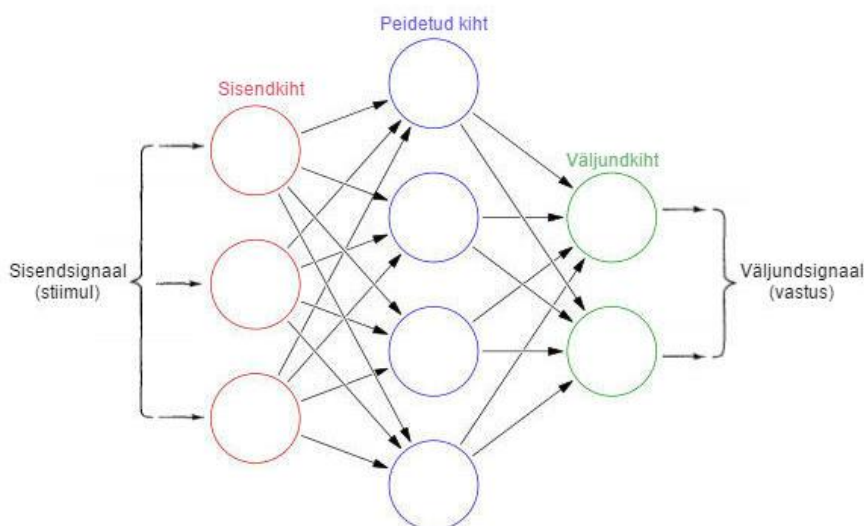
Markovi ahelate teooria rajajaks oli 20. sajandi alguses vene matemaatik Andrei Andrejevitš Markov, keda huvitasid sõltumatud juhuslikud järjestused (Pontius, Malanson 2007). Ta töötas välja tõenäosusliku mudeli, kus objekti järgnev seisund sõltub talle vahetult eelnevast (Remm *et al.* 2012). Markovi tüüpi mudelid on ajalooliselt kõige rohkem kasutatud leidnud erinevate kategooriate vaheliste muutuste prognoosimisel (Pontius, Malanson 2007). Markovi ahelad eeldavad, et maakasutusmuutused on juhuslikud ja ühesuunalised ning iga katse tulemusel objekti seisund muutub (Remm *et al.* 2012). Markovi analüüs on keskendunud taimkatte uuringutele ning hiljuti ka linna- ja maapiirkondade maakasutusmuutustele. Analüüsi on kritiseeritud ruumilisuse puudumise osas, kuid sellest hoolimata on arvukad uuringud suutnud edukalt ennustada ja modelleerida maakasutusmuutusi Markovi maatriksi abil (Henriquez *et al.* 2006).

Markovi ahelat saab kasutada kategooriate vaheliste maakasutusmuutuste modelleerimiseks, kus iga piksel on maastikul liigitatud täpselt ühte kategooriasse ja igal pikslil on mingi tõenäosus muutumaks mõneks teiseks kategooriaks igal vaadeldaval sammul (Pontius, Malanson 2007). Muutus sõltub eelnenud seisundist ja üleminekutõenäosustest. Markovi ahelaks on omavahel üleminekutõenäosustega seotud seisundite jada, mis on esitatud maatriksi kujul (Remm *et al.* 2012). Eestis on Markovi ahelaid oma töös põhjalikult käsitlenud Edgar Sepp (2002) ning Kiira Aaviksoo (1993).

### 1.1.3 Neurovõrk

Neurovõrk imiteerib paljusid omavahel tihedalt seotud ajurakke, mis võimaldavad arvutisüsteemil õppida käituma, ära tunda mustreid ja teha inimesele sarnaseid otsuseid (Haykin 1999). Kuid siiski tuleb meeles pidada, et tegemist ei ole inimajuga vaid ainult arvutisüsteemiga, mis koosneb algebralistest muutujatest ja matemaatilistest võrranditest (Perez-Vega *et al.* 2012).

Neurovõrk võib koosneda mõnekümnest kuni sajast, tuhandest või isegi miljonist kunstlikust neuronist ehk üksusest, mis on jaotatud omavahel mõlemalt poolt ühendatud kihtideks (joonis 1) (Haykin 1999). Sisendkihid saavad erinevas formaadis andmeid välismaailmast, mille toimimist üritab võrk õppida või selles toimuvaid protsesse ära tunda või muul viisil töödelda. Väljundkihid asuvad teisel pool võrku ja annavad märku, kuidas see reageerib õpitud teabele. Sisend- ja väljundkihtide vahel asub üks või rohkem peidetud kihti, mis moodustavad suurema osa tehislikust ajast (Perez-Vega *et al.* 2012). Enamik neurovõrke on täielikult omavahel ühendatud ehk iga peidetud kiht ja iga väljundkiht on ühendatud võrgu mõlemal küljel olevate kihtidega. Kahe kihi vaheline ühendus väljendub kaaluna, mis on kas positiivne (kui üks kiht ergastab teist) või negatiivne (kui üks kiht pärssib teist). Mida kõrgem on kaal seda rohkem mõju avaldab üks kiht teisele (Haykin 1999).



**Joonis 1.** Neurovõrku toimimise protsess (Haykin 1999).

Informatsioon läheb neurovõrgust läbi kahel viisil. Õppimisel või töötamisel (peale õppeprotsessi) juhitakse informatsiooni mustrid sisendkihtide kaudu võrku, mis käivitab peidetud kihid ja neist jõuab informatsioon väljundkihtidesse (Haykin 1999). Õppeprotsessil võrreldakse neurovõrgu toodetud väljundit ja tegelikku väljundit, mida ta oleks pidanud tootma ning neid erinevusi võrreldes modifitseeritakse kaalusid. Selle käigus liigutakse väljundkihist läbi peidetud kihtide tagasi sisendkihti. Edasi-tagasi liikumine põhjustab võrgu õppeprotsessi ja nii vähendatakse erinevust ning saavutatakse kahe võrreldava väljundi vaheline täpsus (Perez-Vega *et al.* 2012).

## **1.2 Eesti valglinnastumine peale taasiseseisvumist**

Kesk- ja Ida-Euroopa riigid hakkasid peale Nõukogude Liidu kokkuvarisemist kiiresti muutuma (Tammaru *et al.* 2009). Turumajanduse tekkimine ja 1990. aastate liberaalne planeerimissüsteem löid Eestis eeldused valglinnastumiseks. Valglinnastumine toimub, kui asulaala levib linnapiirkonna tagamaadele. Seda tüüpi läbimõtlema ruumiline areng omab tihti suurt negatiivset mõju keskkonnale, ala sotsiaalsele struktuurile ning majandusele (Samarüütel *et al.* 2010).

Üleminekuperioodi valglinnastumine oli seotud majanduslike raskustega (suurenenud elukallidus suurtes linnades, tööturu muutused jne). Madalama sotsiaalmajandusliku tasemega inimesed lahkuvad linnast, et leida odavamad eluaset olemasolevates äärelinna asulates või suvilapiirkondades (Samarüütel *et al.* 2010). Samas kõrgema sotsiaalmajandusliku tasemega inimesed otsivad paremaid elutingimusi väljaspool suurlinnade suurelamurajoone, et rajada unistuste eramuid (Tammaru *et al.* 2009). 1990. aastate alguses ehitati siiski vaid mõned üksikud eramajad, sealhulgas lossi mõõtu uusrikaste villad. Elamuehitus oli inimeste enda rahastatav, sest laenu ei olnud veel kättesaadaval. Elamuehitus hakkas hoogustuma 1990. aastate keskel, kuid pidurdus siis 1998. aasta Vene majanduskriisi tulemusel (Tammaru *et al.* 2009).

Valglinnastumine on tihedalt seotud riigi ja inimeste majandusliku olukorraga (Kährik, Tammaru 2008). Eesti riiki tuntakse kui varajaste, radikaalsete ja edukate reformide läbiviijat (Palang 1998). Reformide tulemuseks oli üleüldine majanduskasv ja inimeste personaalse rikkuse kiire kasvamine alates 1990. aastate lõpust. Paralleelselt toimus intressimäärade alandamine ja ka Lääne-Euroopas kiirenes majanduskasv. See kõik koos viis väga kiire kinnisvara- ja laenuturu kasvuni 2000. aastate esimesel poolel (Tammaru *et al.* 2009). 2003.

aastal avas laialdane juurdepääs laenudele paljudele keskklassi kuuluvatele inimestele võimaluse ühepereelamute ostuks, mis tõi kaasa ulatusliku äärelinna elamupiirkondade arendamise (Roose *et al.* 2013).

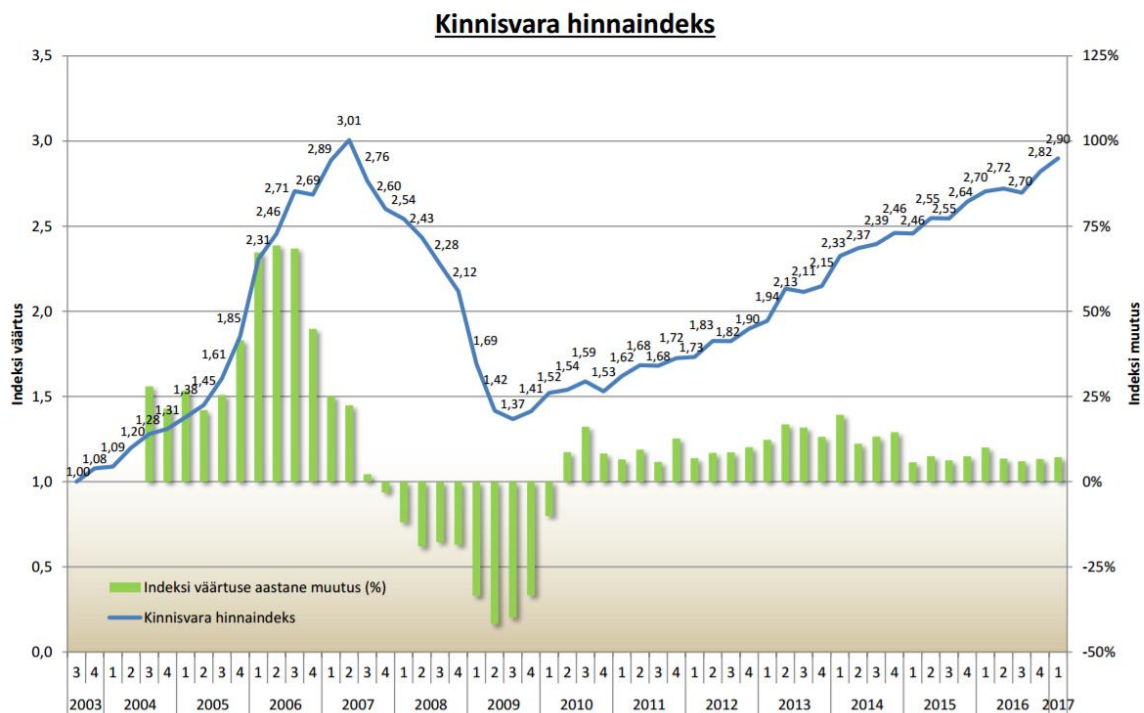
Töökohtade järsk kadumine põllumajandussektoris suurte ja mõjuvõimaste kolhooside lagunemise tõttu 1990. aastate alguses eemaldas peamise takistuse Tallinna lähiümbruse valglinnastumisel. Isegi veel nõukogude aja lõpus lõppesid põllumaad Tallinna piiril ja just need piirkonnad muutusid elamuarendajatele eriti atraktiivseteks. Umbes pooled alates 1991. aastast ehitatud uutest asulatest paiknevad endistel põllumaadel (Tammaru *et al.* 2009). Uute elamute ehitamine on peaaegu eranditult koondunud suurte linnade lähipiirkondadesse. 2000. aastatel rajatud uuselamurajoonid asuvad linnale lähemal, kui 1990. aastatel ehitatud. Kaugus linnast on kõige olulisem tegur äärelinna uuselamurajoonide rajamisel (Tammaru *et al.* 2009, Samarüütel *et al.* 2010). Kuid mida rohkem suureneb kaugus linnast, seda enam väheneb põldudele ja niitudele rajatud elamute hulk ning suureneb ehitus olemasoleva asustuse või metsa aladel (Tammaru *et al.* 2009, Samarüütel *et al.* 2010, Kährik, Tammaru 2008). Tallinna näitel võib öelda, et alates 1991. aastast ehitatud äärelinna uuselamupiirkonnad asuvad väga lähedal merele (Samarüütli *et al.* 2010). Umbes pool uuselamupiirkondadest asub 5 km kaugusel rannikust ja  $\frac{3}{4}$  sellest 10 km raadiuses (Tammaru *et al.* 2009). Lisaks on uued elamupiirkonnad koondunud põhimaanteede äärde (Samarüütli *et al.* 2010) ja linnast kõige kaugemale jäävad asustused paiknevad vaid pikki põhimaanteid (Roose *et al.* 2013).

Uuselamupiirkondade ruumiline muster järgib eelnevat asustusstruktuuri. Kuna elamupiirkondade arendamine on arendajatele kasumlik, siis asuvad elumajad suhteliselt lähedal juba olemasolevatele elamupiirkondadele, kus on olemas enamik vajalikust infrastruktuurist (Roose, Gauk 2015). Juba olemasolevast asulaalast väga kaugel asuvad elamurajoonid on väga harvad ja tavaliselt tekkinud pikema aja jooksul (Tammaru *et al.* 2009). 1990. aastate lõpus ja 2000. aastate alguses olid elamukrundid avarad, kuni 3000 ruutmeetrit. Uued elamupiirkonnad on väikesed, keskmiselt elab neis umbes 30 leibkonda ning krundi suurused jäävad alla 1000 ruutmeetri (Kährik, Tammaru 2008). Looduskaunites kohtades asuvad arendused on kõrgema kvaliteediga, suurte 1000–1500 ruutmeetrite aladega ning eraldatumad ja hinnatundlikule ostajale kallid (Roose *et al.* 2013). Eeslinna elamupiirkondade eeliseks peetakse lisaks hinnale just suuremat privaatsust ja ruumikust võrreldes linnas asuvate eramutega (Roose, Gauk 2015).

21. sajandi märksõnaks peetakse elamuehituse õitsengut ja valglinnastumist, mis intensiivistus 2003. aastal ja jätkus kuni majanduslanguse alguseni 2008. aastal. Suur osa SKP kasvust oli

pärit ehitustegevusest, mis sageli põhines välispankade laenudel. Peale 2008. aasta suve paljud uued eramuehitus projektid seiskusid ning kiire valglinnastumine oli suures osas lõppenud (Samarüütel *et al.* 2010). Elamuehitus oli 1990. aastatel tagasihoidlik, kuid kasvas kiiresti 2000ndatel. Üks kolmandik uute äärelinna asulate elanikest elab 2005. aastal valminud hoonetes (Tammaru *et al.* 2009). 2000. aastate äärelinna uuselamuehitus oli ajendatud kinnisvaraarendajate huvist ja enamikel juhtudel ei järgnenud pikaajalist planeerimisstrateegiat (Samarüütel *et al.* 2010). Äärelinna arengu nõrk kontroll kohalike ametiasutuste poolt soosis valglinnastumist. Kohalike ametiasutuste minimaalne roll eramuehitamise reguleerimisel tulenes kohalike omavalitsuste konkurentsist jõukate elanike meelitamisel aga see põhjustas minimaalseid nõudeid arendajatele (Kährik, Tammaru 2008). Ajutine maakasutuspoliitika ja juhtumipõhine planeerimine oli kiire valglinnastumise ajal ülekaalus (Roose *et al.* 2013).

Joonisel 2 on ära toodud Maa-ameti 2017. aasta esimeses kvartalis avaldatud kinnisvara hinnaindeks ja selle dünaamika alates 2003. aasta kolmandast kvartalist. Antud kinnisvara hinnaindeks hõlmab kõikide kinnisvara võõrandamise tehingute andmeid. Jooniselt on selgelt näha, et hinnaindeks hakkab saavutama ehitusbuumi aegset taset. Tõus ei ole olnud järsk nagu aastatel 2003–2007, vaid aastate jooksult sujuvalt kasvanud. Tartu 2035. aasta elamuproгноosis (Roose, Gauk 2015) selgub, et aastaks rajatakse keskmiselt 365 uut kodu Tartu eeslinna. Kuigi rajatavate hoonete hulk on suur, ei saavuta see enam buumiaegset taset vaid jääb pigem sellele järgnenud perioodiga sarnasele tasemele. Uued elamupiirkonnad püsivad juba olemasoleva asustumistri sees, kus arenduskulud on madalamad.



**Joonis 2.** Kinnisvara hinnaindeks (Maa-amet 2017a)

### 1.3 Hüpoteesid

Lähtuvalt teoreetilisest ülevaatest, mis keskendus modelleerimisele, kasutatava programmi tutvustamisele ning ajaloolise valglinnastumise uurimisele Eestis, on järgnevas alapeatükis sõnastatud magistritöö hüpoteesid.

**Hüpotees 1:** *Põllu- ja rohumaa osakaalu suur vähenemine kõigil vaadeldavatel perioodidel aga eelkõige perioodil 1989–2007.*

Kuna uurimisalad hõlmavad Eesti nelja suurimat linna ja nende linnalähipiirkondi, mis on suures osas ümbritsetud just põllu- ja rohumaaest siis muutused on antud aladel olnud suurimad. Esimene vaadeldav perioodi hõlmab endas ka ehitusbuumi aastaid, mille käigus hoonestati suur osa linnade äärseid põllu- ja rohumaid. Antud aladel oli ehitamine odavam, kui metsamaadel ning kolhooside lagunemine võimaldas linnadel põllumaadele laieneda.

**Hüpotees 2:** *Olemasoleva asustuse suur mõju asulaalade laienemisele.*

Linnalähipiirkondade arendajatele on oluline projektide kasumlikkus ning selleks on parimad just olemasoleva asula lähipiirkonnad, sest antud aladel on olemas juba teatud taristu. Lisaks omavad need alad head juurdepääsu, mis on oluline nii arendajatele kui tulevastele elanikele.



**Hüpotees 3:** *Modelleerimine on täpsem kompaktselt kasvanud linnade puhul, kus erinevaid tõukejõude on vähem.*

Kompaktselt kasvanud linnade puhul ei ole palju erinevaid tõukejõude, mis võimaldab saavutada täpsemaid tulemusi. Uuritavatest linnadest on kompaktselt kasvanud näiteks Tartu, kus eeldatavalt tõukejõude ei ole väga palju ja linna kasvamine on olnud kontsentreeritud. Samas on kompaktselt kasvanud ka Narva, sest antud uurimisala on kasv lihtsalt olnud väga väike. Sarnast probleemi vaatlesid ka Henriquez *et al.* (2006) oma uurimuses, kus kompaktse linna kasvamise mudeli täpsuseks saadi 88% ja laiali valguval linnal 77%.

## 2 ANDMED JA METOODIKA

### 2.1 Uurimisalad ja andmed

Antud magistritöös vaadeldaks nelja pindalaliselt kõige suuremat linna Eestis- Tallinn, Tartu, Narva ja Pärnu. Tallinn ja Pärnu paiknevad rannikul, Narva asub Eesti-Vene piiril ning Tartu Lõuna-Eestis. Modelleeritavate alade suurus varieerub, olenedes linna ja selle lähiümbruse asustuse tihedusest ning suuruselt. Iga uurimisala kohta vaadeldi kolme erineva perioodi 30 meetrise resolutsiooniga satelliidipilti (tabel 1). Satelliidipildid pärinevad USA Geoloogiateenistuse GloVis (2017) andmebaasist ja 30 meetrise resolutsiooniga kõrgusmudel Earth Exploreri (2017) andmebaasist. Landsat satelliidipiltide eeliseks on pikk aegrida, mistõttu ei kasutatud näiteks Sentinel-2 10 meetrise resolutsiooniga andmeid, sest need ei oleks võimaldanud ajaloolist maakasutusmuutust hinnata. Erineva resolutsiooniga modelleerimine tekitab aga probleeme, sest programmi tööks peavad alusandmed kõik olema ühe resolutsiooniga ning samuti oleks sellisel juhul ühe perioodi maakasutuskartid oluliselt täpsemad. Andmed teede, jõgede ja linnade administratiivpiiride kohta pärinevad Maa-ameti (2017b) andmebaasist. Lisaks kasutati Maa-ameti ortofotosid ning ajaloolisi kaarte klassifitseerimise läbiviimisel ja klassifitseeritud kaartide täpsuse hindamisel.

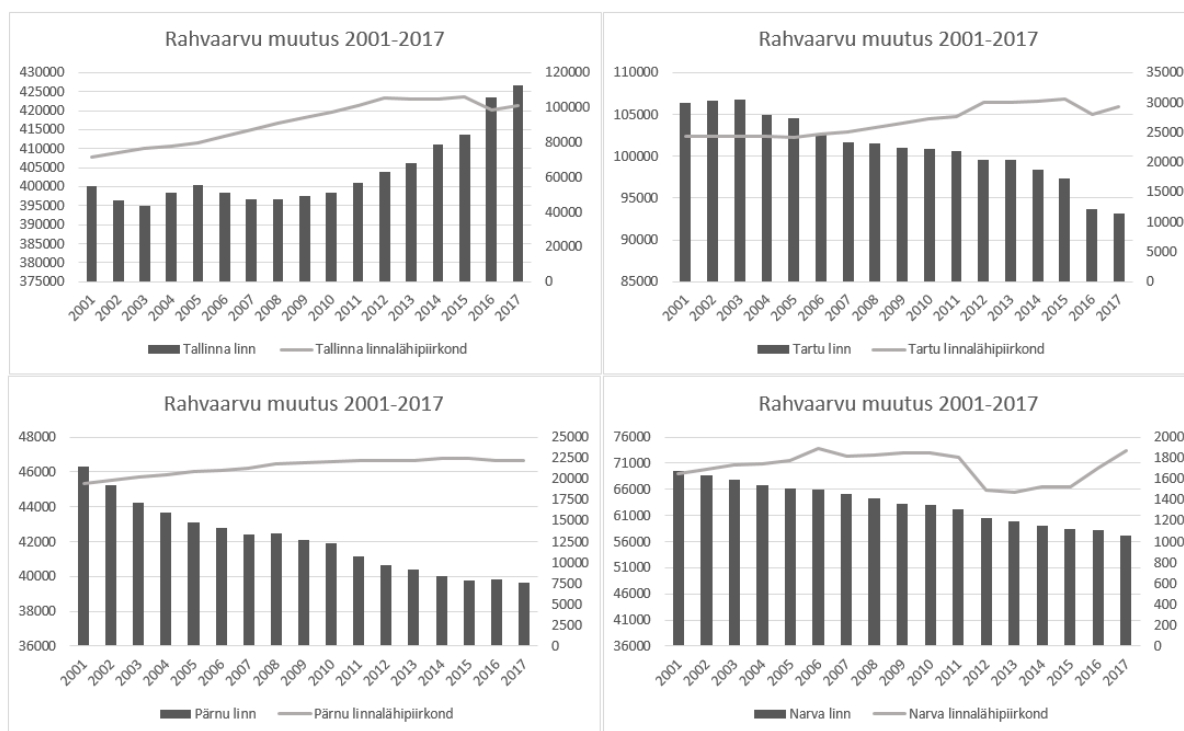
**Tabel 1.** Uurimisalade satelliidipiltide metaandmed.

Linn	Aasta	Kuupäev	Ruumiline resolutsioon	Level	Satelliit	Sensor	Spektraal-kanalite arv	Veerg/Rida
Tartu	1989	4.06	30 m	L1TP <sup>1</sup>	Landsat 5	TM	7	595/524
	2007	9.08	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	595/524
	2016	14.06	30 m	L1TP	Landsat 8	OLI-TIRS	11	595/524
Tallinn	1989	4.07/ 04.07	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	1408/1081
	2007	20.06/ 20.06	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	1408/1081
	2015	22.08 /20.08	30 m	L1TP	Landsat 8	OLI-TIRS	11	1408/1081
Pärnu	1989	4.07	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	675/471
	2007	23.08	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	675/471
	2016	14.07	30 m	L1TP	Landsat 8	OLI-TIRS	11	675/471
Narva	1989	4.06	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	430/558
	2007	17.07	30 m	L1TP	Landsat 5	TM	7	430/558
	2015	24.08	30 m	L1TP	Landsat 8	OLI-TIRS	11	430/558

<sup>1</sup> L1TP= terviklik maastiku korrektsioon annab süstemaatilise, radiomeetrilise ja geomeetrilise täpsuse samas kaasates Kõrgusmudelit topograafilise täpsuse saavutamiseks.

Antud perioodide valikul sai otsustavaks kaks faktorit: *LCMi* võimekus ja Eesti ajalooline areng. *LCMi* võimalusi uurinud autorid on toonud välja tema lühiajaliste ennustuste täpsuse (Perez-Vega *et al.* 2012, Khoi, Murayama 2011). Sarnaselt teistele *LCM* tööd uurinud autoritele on ka antud töös võetud modelleeritava perioodi pikkuseks kahe ajaloolise maakasutuskaardi vaheline periood (Tewolde, Cabral 2011, Khoi, Murayama 2011). Eesti linnade arengu uuringutele toetudes võib öelda, et nõukogude ajal oli elamuehitus linnalähialadel väga minimaalne, küll aga hakkas see tõusma 21. sajandi algusaastatel. Seega toetudes kahele olulisele faktorile otsustati uurimisperioodi alguseks võtta Eesti taasiseseisvumise aasta. Antud aasta satelliidipiltidest aga ei leitud ühtegi piisavalt pilvevaba pilti ning seetõttu otsustati võtta järjest aastaid varasemaks. 1990. aasta pildid olid vigased ning nii saadigi piisavalt hea kvaliteediga pildid alles aastast 1989. Esimese uuringuperioodi sisse pidi kindlasti jääma ehitusbuumi aastad, et oleks võimaliku jälgida selle mõju linnalähialade arengule. Teooriale tuginedes võib öelda, et 2005. aasta lõpuks oli enamik ehitusbuumi aegsest hoonestusest valmis (Tammaru *et al.* 2009, Samarüütel *et al.* 2010). Kuid jällegi olid 2006. aasta pildid pilvised ning töö kvaliteedi huvides võeti aluseks satelliidipildid aastast 2007. Viimasesse vaadeldavas perioodi, aastasse 2007–2016, ei jää otseselt ehitusbuumi, aga teooriale põhinedes võib öelda, et kinnisvara ostu-müügitehingud on vaikselt kasvades saavutamas ehitusbuumi aegset taset.

Joonisel 3 on ära toodud Statistikaameti (2017) rahvaarvu muutumise statistika aastatel 2001–2017. Eraldatud on neli suurimat linna ja nende linnalähipiirkonnad. Linnalähipiirkondadeks on uuringualadesse jäävad vallad ning enamasti on tegu täpselt linna administratiivpiiri äärde jäävate linnade lähivaldadega. Statistikast selgub, et ainsaks linnaks, kus rahvaarv on olnud pidevas tõususes on Tallinn, teistes linnades on olnud pidev rahvaarvu vähenemine. Linnalähipiirkondade rahvaarvu muutumise poolest sarnanevad omavahel Tallinn ja Tartu, kus kasvu dünaamika on olnud väga sarnane. Pärnu puhul on lähivaldades täheldada aastate jooksul vaid väga väikest kasvu, jäädes saja või paarisaja inimeseni aastas. Narva linnalähipiirkonnades esinenud muutus on väga hüplik, kord kasvades ja siis jälle kahanedes. Selget ehitusbuumi mõju lähivaldade rahvaarvu muutusel statistikast näha ei ole, kuid kahjuks ei ole sellise täpsusega statistikat varasematest aastatest ning võimalik, et see lihtsalt seetõttu ei avaldu.



**Joonis 3.** Rahvaarvu muutus uuringualade linnades ning nende linnalähihiirkondades.

### 2.1.1 Satelliidipiltide eeltöötus ja klassifitseerimine

Satelliidipiltide kasutamine on muutnud maakasutuse kaardistamise ja muutuste tuvastamise efektiivsemaks ning usaldusväärsemaks (Tewolde, Cabral 2011). Linnade kasvu jälgimiseks ja analüüsiks on oluline omada ajaloolist informatsiooni maakasutusest. Eeltöötuseks ja klassifitseerimiseks kasutati programmi ArcMap 10.2.

Landsat TM satelliidipildi suuruseks on umbes 190 kilomeetrit põhja-lõuna suunas ja umbes 190 kilomeetrit ida-lääne suunas resolutsiooniga 30 meetrit kõigil spektraalkanalitel välja arvatud kuues kanal, kus resolutsioon on 120 meetrit. Uuringualad katavad ühest pildist vaid väga väikese osa. Kõikidest kanalitest välja arvatud kuues eraldati edasiseks klassifitseerimiseks vaid uuringuala. Satelliidipiltide eeltöötus ja klassifitseerimine on edasise analüüsi ning modelleerimise üks kriitilisemaid etappe, mis määrab ära modelleerimise edukuse (Tewolde, Cabral 2011, Narusk 2014).

Tabelist 1 on näha, et satelliidipildidel on teostatud juba süstemaatiline, radiomeetriline ja geomeetriline korrektsioon. Lisaks tehti kõigile piltidele atmosfääri korrektsioon, et eemaldada iga sagedusriba ümber atmosfääri hägu ehk atmosfääri mõju. Atmosfääri korrektsioon viidi läbi

kasutades programmi ArcMap raster kalkulaatorit ning satelliidipiltide metaandmeid, kasutades valemit:

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{CAL} + A_L$$

$L_{\lambda}$ - spektraalne kiirgustihedus

$M_L$ - kiirgustiheduse multiplikatiivne skaleerimistegur (RADIANCE\_MULT\_BAND\_n metaandmetest)

$Q_{CAL}$ - algne satelliidipildi pikslite väärtus

$A_L$ - kiirgustiheduse aditiivne skaleerimistegur (RADIANCE\_ADD\_BAND\_n metaandmetest)

Klassifitseerimisel kasutati näidistega klassifitseerimist, mille käigus määrati igale maakasutus kategooriale iseloomulikud näidisalad. Narusk (2014) võrdles ühe osana oma magistritööst erinevate programmidega tehtud klassifitseerimiste tulemusi. Ta võttis vaatlus alla ühed levinumad kommertstarkvarad ENVI, Erdas ja Idrisi Selva. Tulemustest selgus, et näidistega klassifitseerimisel ei omanud suurt rolli kasutatav tarkvara, sest erinevates tarkvarades tehtud klassifitseerimised erinesid mitte rohkem kui 5%. Seetõttu otsustati antud töös just näidistega klassifitseerimise kasuks. Näidisalade kaardistamisel veenduti tegelikus maakasutuses ortofotode ning ajalooliste kaartide abil. Oluline oli, et näidisalad jaotuksid kogu kaardi pinnale, et kindlustada täpsem klassifitseerimine. Enim tuli tähelepanu pöörata asulaalade määramisele, sest seal esines palju segupikslid. Eesti linnad ja linnalähipiirkondade elamurajoonid ei ole suures osas vettpidava maakattega kaetud, vaid linnades esineb palju taimkattega alasid, mis põhjustab segupikslite tekkimist. Segupikslites on esindatud rohkem kui üks maakasutustüüp (Erik 2013).

Eesti maakasutus klassifitseeriti kuude erinevasse kategooriasse: märgala, asula, põllu- ja rohumaa, metsamaa, tehisala ja veekogud (tabel 2). Põllu- ja rohumaa koondati üheks kategooriaks, sest teooriale põhinedes võib öelda, et asulaalad laienevad enamasti madala taimkattega aladele (Kirsimäe 2015, Tammaru *et al.* 2009, Prieto-Amparán *et al.* 2016). Samuti oleks satelliidipiltide klassifitseerimisel neis alades esinenud väga palju vigu ning klasside ühendamise võimaldas seda vältida (Narusk 2014).

**Tabel 2.** Maakasutuse kategooriad

Number	Maakasutuse kategooria	Kirjeldus
1	Veekogu	Seisu- ja vooluveekogud
2	Tehisala	Asulaalast selgelt eraldunud, inimese poolt loodud alad nagu näiteks turba kaevandusalad
3	Metsamaa	Kõik metsaalad
4	Põllu- ja rohumaa	Kõik põllu- ja rohumaa alad
5	Asula	Kõik vettpidava kihiga alad
6	Märgala	Kõik märgalad

Klassifitseerimise kvaliteedi määramiseks viidi läbi täpsuse hindamine ning moodustati vigade maatriks (Yuan *et al.* 2005). Kaartide valideerimiseks valiti iga maakasutusklassi kohta visuaalselt hinnates 60 punkti. Visuaalse hindamise juures kasutati nii satelliidipilte kui ka erinevaid Maa-ameti kaarte ning ortofotosid.

Joonisel 4 on ära toodud, kuidas klassifitseerimise hindamise vigade maatriks on koostatud. Diagonaalil olevad väärtused näitavad, kui palju võrdluspunktidest vastab samale klassifitseeritud alale. Ülejäänud väärtused näitavad valesti klassifitseeritud punktide arvu. Tootja täpsus on tõenäosus, et võrdluspunkt on õigesti klassifitseeritud ja kasutaja täpsus näitab, et klassifitseeritud maakasutus punktid on õigesti klassifitseeritud. Samuti on vigade maatriksis on ära toodud üldine täpsus ja Kapa kordaja. Üldine täpsus on klassifitseerimise täpsus, mis saadakse korrektselt klassifitseeritud punktide summa jagamisel kogu võrdluspunktide arvuga. Kapa kordaja annab üldise hinnangu klassifikatsiooni täpsusele. Kapa väärtus 1 näitab 100% täpsust ja 0 täielikku ebatäpsust. Minimaalseks täpsuseks, mille korral on kaardid piisavalt täpsed edasiseks analüüsiks, loetakse 85% (Tewolde, Cabral 2011). Kui Kapa kordaja või mõne kategooria tootja või kasutaja täpsus jääb liialt madalaks, tuleks uuesti läbi viia klassifitseerimine ning lisada näidisalasid (Yuan *et al.* 2005).

Klassifitseeritud maakasutus	Võrdluspunktid						Kokku
	Veekogu	Tehisala	Metsamaa	Põllu- ja rohumaa	Asula	Märgala	
Veekogu	58	0	1	0	0	0	59
Tehisala	0	51	0	0	0	0	51
Metsamaa	0	1	53	4	0	3	61
Põllu- ja rohumaa	2	7	5	53	8	8	83
Asula	0	0	1	2	52	0	55
Märgala	0	1	0	1	0	49	51
Kokku	60	60	60	60	60	60	360

Tootja täpsus:	58/60=96.6%	51/60	53/60	53/60	52/60	49/60
Kasutaja täpsus:	58/59=98.3%	51/51	53/61	53/83	52/55	49/51
Üldine täpsus	(58+51+53+53+52+49)/360=88%					

**Joonis 4.** Täpsuse hindamise näide

### 2.1.2 Tegurid

Lisaks klassifitseeritud maakasutuskaartidele loodi üleminekupotentsiaali kaartide tegemiseks vajalikud tegurite kaardid. Antud magistritöös vaadeldi ainult looduslikke tegureid ning nende loomisel tugineti Kirsimäe (2015) lõputööl, kus uuriti maakonnakeskuste kasvamise mõjutegureid. LCM ei sea teguri kaartide mahule piiranguid ning teooriale tuginedes loodi esialgu üheksa erinevat kaarti:

1. Kaugus teedest- *DISTANCE* mooduliga loodud kaart, kus kujutatakse kaugust põhi-, kõrval- ja tugimaanteedest. Teooriale põhinedes on asustuse laienemisel parimateks piirkondadeks teest 500 meetri kuni ühe kilomeetri kaugusele jäävad alad (Tian, Wu 2015, Tewolde, Cabral 2011).
2. Kaugus põhiteedest- *DISTANCE* mooduliga loodud kaart, kus kujutatakse kaugust vaid põhiteedest. Teooria kohaselt laienevad asulaalad enim just pikki põhiteid (Tian *et al.* 2016, Tian, Wu 2015).
3. Kaugus veekogudest- *DISTANCE* mooduliga loodud kaart, kus kujutatakse kaugust nii siseveekogudest kui ka merest. Asustuse laienemisel peetakse parimateks piirkondadeks veekogudest 1 kilomeetri kaugusele jäävaid alasid (Tian, Wu 2015).
4. Kaugus merest- *DISTANCE* mooduliga loodud kaart, mis kujutab kaugust merest. Rannikul asuvate linnade puhul on näha asula laienemist mööda rannikut (Tammaru *et al.* 2009, Tian, Wu 2015).

5. Kaugus olemasolevast asustusest- *DISTANCE* mooduliga loodud kaart, kus kujutatakse kaugust 1989. aasta asustusest. Varasemale uurimusele põhinedes peetakse linna laienemisel parimateks olemasolevast asustusest 500 meetri raadiusesse jäävaid alasid (Henriquez *et al.* 2006, Tewolde, Cabral 2011).
6. Kaugus linna administratiivpiirist- *DISTANCE* mooduliga loodud kaart, kus kujutatakse kaugust linna administratiivpiirist.
7. Kõrgusmudel
8. Maakasutus- antud kaardil on ära toodud maakasutuse asulaks muutumise tõenäosus. Asustuse laienemisel peetakse parimateks põllu- ja rohumaid.
9. Lisaks eespool nimetatud teguritele lisati ajaline kaugus kesklinnast. Selle tegemiseks kasutati ArcGIS programmi *NETWORK ANALYST* tööriista ning aluseks võeti Maaameti teede info. Asula laienemise uurimisel on antud tegurit kaasatud uuringutesse, kui tegemist on kompaksete linnade ja linnalähipiirkondadega (Tewolde, Cabral 2011, Henriquez *et al.* 2006, Tian *et al.* 2016).

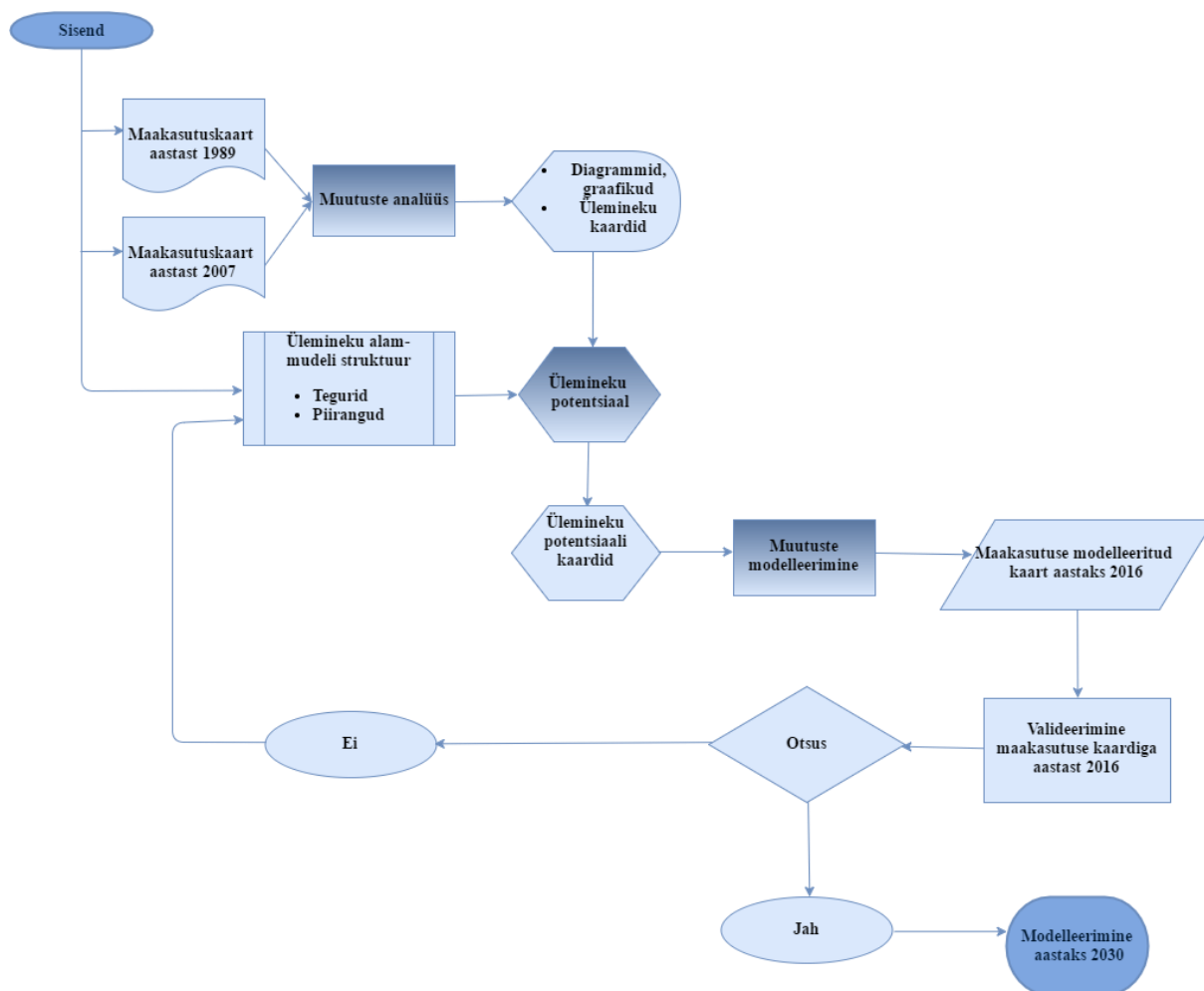
### 2.1.3 Analüüsi ja modelleerimise metoodika

Maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine viidi läbi programmiga IDRISI ning varem käsitletud mooduliga *LCM*. *LCM* seab kasutatavatele algandmetele rida nõudeid, mis kehtivad nii kasutatavatele maakasutuskaartidele kui ka teguritele. Kaartidel kujutatud territoriaalne ulatus ning tausta suurus peab olema sama ja tausta väärtuseks määratud null. Kõigil kasutatavatel kaartidel peavad olema identsed piksli suurused ning sama koordinaatsüsteem. Maakasutuskaartide juures on oluline, et legendi kategooriate arv ning nende nimetused oleksid identsed (Eastman 2012).

*LCM*iga tehtavad olulisemad sammud on kujutatud joonisel 5. *LCM*iga modelleerimisel on vajalik kahe erineva perioodi samade kategooriatega maakasutuskaarti. Modelleerimine viidi läbi kahes osas. Esiteks tehti modelleerimine 1989. ja 2007. aasta kaartide põhjal aastaks 2016. Antud mudel valideeriti ning seejärel tehti kalibreeritud mudeli abil modelleerimine 2007. ja 2016. aasta kaartide põhjal aastaks 2030. 1989., 2007. ja 2016. aasta maakasutuskaarte kasutati *LCM* sisenditena, et paremini mõista maakasutuskategooriate kasvu, kahanemise ja üleminekute dünaamikat ning mahtusid. Analüüsi tulemusi on võimalik kujutada nii graafikute kui ka kaartidena (TerrSet 2016). *LCM* esitab nii koondgraafikuid kui iga maakasutusklassi kohta eraldi graafikud. Kaartide puhul on võimalik rakendada erinevaid piiranguid- näiteks



välja jätta liiga väikesed muutuste alad või kujutada vaid teatud muutused läbi teinud alad (Eastman 2012). 1989. ja 2007. aasta maakasutuskaarte analüüsi ning tehti kindlaks muutusi esile kutsuvad tegurid iga ülemineku puhul. Uuritavad alad hõlmasid põhiliselt asulaalasid, seega tegid need läbi suuremad muutused ning arvesse võeti vaid need üleminekid.



**Joonis 5.** Mudeli kalibreerimise, simuleerimise ja valideerimise metodoloogia.

Enne maakasutusmuutuste modelleerimist on vaja modelleerida potentsiaalsed üleminekid, kasutades ajaloolisi maakasutuskaarte ning selgitavaid tegureid (kaugus teedest, nõvad, pinnase tüüp jne) (TerrSet 2016, Roosaare 2009). Tegurite puhul on tegemist rastritega, mis on koostatud iga maakasutusmuutust mõjutava nähtuse kohta ning kus kujutatakse muutuseks soodsamaid ning ebasoodsamaid alasid (Sepp 2002). Tavaliselt kasutatakse tõenäosuslike kaarte piksli väärtustega 0–1, kus 0 kujutab ebasobivaid ning 1 kõige sobivamaid alasid (Khoi,

Murayama 2011). Kaugusel põhinevate tegurite loomisel kasutati IDRISI moodulit *DISTANCE*, mis leiab aluseks antud rastri põhjal kaugust kirjeldavad kaardid. Antud mooduliga loodi kauguse kaardid teedest, veekogudest (seisu- ja vooluveekogud), olemasolevast asustusest, linna administratiivpiirist. Lisaks võeti tegurite juures vaatluse alla kõrgusmudel ning programmiga ArcGIS loodud ajalise kauguse kaardid kesklinnast, milleks kasutati *NETWORK ANALYSTI* tööriista. Samuti kaasati tegurite hulka ka maakasutusmuutuste tõenäosuse kaart lähtudes linnastumisest, kus põllu- ja rohumaad kõige tõenäosuslikumad elamu ehitamiseks.

Peale maakasutusmuutuste analüüsi kinnitati modelleeritavad üleminekud ja tehti kindlaks üleminekute asukohad. Kui üleminekute tõukejõud olid samad siis koondati need ühe üleminekupotentsiaali mudeli alla. Kasutatavad tegurid võivad olla kas staatilised, väljendades uuritava muutuse peamist sobivust või dünaamilised, ajatundlikud muutujad nagu näiteks kaugus olemasolevast asustusest või infrastruktuurist. Dünaamilisi tegureid arvutatakse iga iteratsiooni korral terve modelleeritava ajavahemiku jooksul ümber (Eastman 2012). Potentsiaalseid tegureid võimaldab *LCM* hinnata, arvutades muutujate korrelatsioonikordaja Crameri V. Selle väärtus on 0–1, mis näitab siis vastavalt täiesti ebaolulist tegurit ja absoluutselt suurepärast tegurit (Khoi, Murayama 2011). Tegurid, mille Crameri V on 0,15 või kõrgem, on kasulikud, aga need, mille väärtus on 0,4 või suurem on head ehk kõik tegurid, mille väärtus on üle 0,15 võivad osutada modelleerimise juures vajalikeks. Küll aga on tegemist väga ligikaudse testiga ning see ei tunne ära interaktsioonide mõju. See annab vaid suunised, kas antud tegurit on mõtet kaaluda modelleerimisel või mitte (Eastman 2012). Kui tegurid on valitud, on võimalik koostada ülemineku potentsiaali kaardid, mis näitavad iga piksli asulaalaks muutumise tõenäosust.

Üleminekute potentsiaali kaartide koostamiseks on kaks võimalust- logistiline regressioon või neurovõrkude meetod. *LCM* autorid soovivad kasutada neurovõrku, mida antud töös on ka tehtud. Neurovõrgu parameetrid, mida tavaolukorras muutma ei pea, seadistab *LCM* ise, probleemide korral on viga enamasti lähteandmetes (Roosaare 2009). Neurovõrgu eeliseks peetakse tema võimet modelleerida keerukaid seoseid muutujate vahel (Perez-Vega *et al.* 2012). Lisaks võimaldab ta võtta arvesse nii lineaarseid kui ka mitte-lineaarseid struktuure (Haykin 1999). Kaartide koostamisel on juhtumite arvuks uurimisala pikslite arv, millest igal iteratsioonil valitakse pool õppeks ja pool kontrollimiseks. Kõigepealt koostatakse mudel ning selle põhjal ülemineku potentsiaali kaart. Heaks peetakse mudeleid, mille õppe ja kontrolli

pikslite võrdlemise täpsus jääb 75%–80% vahele, täpsuse juures alla selle tuleks läbi viia uus mudeli koostamine ning üle vaadata tegurid (Eastman 2012).

Muutuste modelleerimine põhineb ülemineku potentsiaali maatriksil ning üleminekupotentsiaali kaartidel. Modelleeritavate muutuse hulka on võimalik leida kasutades Markovi ahelatel põhinevat analüüsi või mõne väliselt koostatud mudeli abil (TerrSet 2016). *LCM* lubab dünaamiliste muutujate korral määrata ümberarvutuste kordade arvu, mille tagant muutujaid uuendatakse. Peale mudeli kalibreerimist tehti esimene prognoos aastaks 2016, põhinedes 1989. ja 2007. aasta maakasutuskkaartidel. Modelleerimise väljundiks on kas jäik või pehme ennustus. Jäik hinnang on 2016. aasta kaart, kus igale pikslile on omistatud ühe maakasutusklassi väärtus. Pehme hinnang on aga tõenäosuskaart, kus igale pikslile on omistatud väärtus 0–1, mis näitab iga piksli tõenäosust muutumaks asulaks 2016. aastaks. Jäik ennustus annab vaid ühe realiseerumisvõimaluse, pehme seevastu aga kujutab ülemineku tõenäosust. Pehmet mudelit soovitatakse elupaikade ja bioloogilise mitmekesisuse hindamiseks. Igal ajahetkel on tavaliselt rohkem alasid, millel on potentsiaali muutuda, kui tegelikult muutub. Seega on väga raske jääda range hinnangu juurde, sest see on vaid üks võimalikest stsenaariumitest. Pehme ennustus kaardistab ära kõik alad, millel on isegi väike tõenäosus muutuseks (Eastman 2012).

IDRISI omab tööriistu ka mudeli valideerimiseks, et kinnitada või kindlaks teha ennustuse kvaliteet. Tegemist on väga olulise osaga modelleerimise juures, sest see võimaldab hinnata mudeli kvaliteeti ning vajadusel lisada selgitavaid tegureid (Eastman 2012). Mudeli valideerimisel hinnatakse 2016. aasta prognoosi kaarti tegeliku olukorraga 2016. aastal. Selleks kasutati jäiga hinnangu puhul moodulit *VALIDATE* ja pehme hinnangu puhul moodulit *ROC* (*Relative Operating Characteristics*). *VALIDATE* mooduli tööd on põhjalikult oma magistritöös kirjeldanud Sis (2008). *VALIDATE* moodul hindab kahe kategooriaalse kaardi vahelist ühildumist (Tewolde, Cabral 2011), arvutades seosekordaja Kapa. Reaalse olukorra kaart on võrdluskaart ja prognoositud kaart võrreldav kaart. *VALIDATE* moodul jaotab Kapa paljudeks eri komponentideks: K<sub>no</sub> (üldine kapa, kirjeldab prognoosi üldist kokkulangevust), K<sub>location</sub> (asukoha kapa, kirjeldab prognoosi võimet asukoha kindlaks määramisel) ja K<sub>standard</sub> (Kapa indeks, prognoosi kokkulangevuse ja juhusliku jaotuse vaheline suhe) (Tewolde, Cabral 2011). Kui saavutatakse Kapa väärtused üle 80% siis antud mudeli prognoosi jõudu peetakse tugevaks (Eastman 2012).

ROC moodul keskendub vaid asustusala laienemise uurimisele. Uurides kui hästi tõenäosus kaart prognoosis uue asustuse tekkimist 2016. aastal. See mõõdab kaartide ühildumist olenevalt

piksli asukohast maakasutusklassis, mitte pikslite kogust igas klassis. *ROC* moodul hindab ühe kategooria *boole'i* kaardi ja antud kategooria sobivuskaardi vahelist ühildumist. Võrdluskaardiks on uue asustuse *boole'i* kaart, kus peale 2007. aastat tekkinud uue asustuse pikslite väärtuseks on 1 ja igal pool mujal 0. Võrreldavaks kaardiks on *LCMi* poolt tehtud pehme hinnangu sobivuskaart. Tulemuseks on *ROC* kõver, kus *AUC* (*Area Under Curve*) näitab kahe kaardi vahelist üldist ühildumist. *AUC* väärtus 0,5 näitab kahe kaardi vahelist täielikku juhuslikkust ning väärtus 1 täielikku ruumilist ühildumist (Perez-Vega *et al.* 2012).

Peale mudeli valideerimist viidi läbi pika perioodi modelleerimine, võttes aluseks ajaloolised kaardid aastatest 2007 ja 2016. Seejärel tehti läbi kõik eelpool kirjeldatud sammud ning viimane modelleerimine tehti aastaks 2030. Ülemineku potentsiaali kaartide puhul arvestati vaid neid tegureid, mis eelmise modelleerimise juures mõju avaldasid. Täpsuse hindamist siinkohal enam läbi ei viidud.

## 3 TULEMUSED

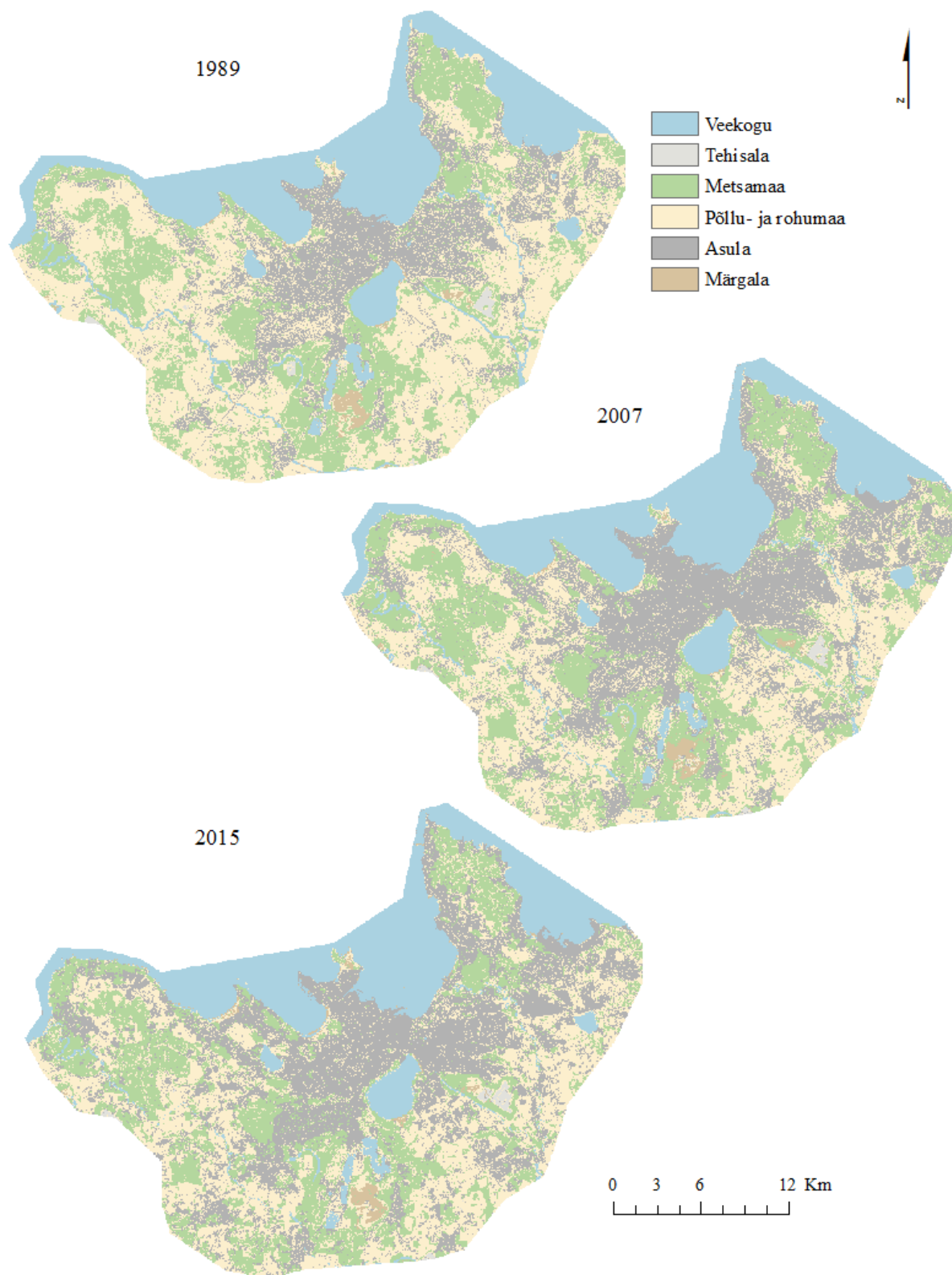
### 3.1 Tallinn

#### 3.1.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine

Tallinna linna ja linnalähipiirkonna satelliidipiltidel eraldusid kõik klassifitseeritavad klassid ning kokku hõlmab uuritav ala natuke vähem kui 79200 hektarit. Tallinna puhul moodustas märgala põhiliselt Männiku raba ning tehisala Rae raba turbaväljad. Lisaks esines märgala ka veekogude kallastel, aga seda vaid väheses ulatuses. Täpsuse hindamise tulemused on koondatud tabelisse 3 ning kolme uurimisperioodi klassifitseeritud kaardid joonisele 6. Tabelist on näha, et kaartide üldine täpsus ja Kapa kordaja on suuremad minimaalsest soovitatud täpsusest, aga 1989. aastal vaid väga napilt. Tootja ja kasutaja täpsust vaadates on näha, et suures osas viivad täpsuse alla märgala ning põllu- ja rohumaa. Märgala klassifitseerus põllu- ja rohumaaiks ning vähesel määral ka metsamaaks viies nii tootja kui ka kasutaja täpsuse alla. Kui vaadata põllu- ja rohumaa kasutaja täpsust kõigil vaadeldavatel aastatel siis on näha, et antud väärtus jääb pidevalt alla soovitatud minimaalse piiri. Siinkohal on tegemist asula ja märgala pikslitega, mis klassifitseerusid põllu- ja rohumaaiks.

**Tabel 3.** Tallinna maakasutuskaartide 1989., 2007. ja 2015. aasta veamaatriksi kokkuvõte.

Maakasutus	Tootja täpsus			Kasutaja täpsus		
	1989	2007	2015	1989	2007	2015
<b>Veekogu</b>	1.00	0.98	1.00	0.98	1.00	1.00
<b>Tehisala</b>	0.93	0.93	0.87	0.93	0.97	0.96
<b>Metsamaa</b>	0.94	0.99	0.96	0.97	0.97	0.93
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	0.92	0.80	0.94	0.70	0.83	0.81
<b>Asula</b>	0.81	0.93	0.91	0.96	0.88	0.96
<b>Märgala</b>	0.67	0.83	0.73	1.00	0.93	1.00
Maakasutuskaart	<b>1989</b>		<b>2007</b>	<b>2015</b>		
<b>Üldine täpsus</b>	0.89		0.91	0.92		
<b>Kapa</b>	0.86		0.89	0.90		



**Joonis 6.** Tallinna linna ja selle lähiümbruse kolme vaadeldava perioodi klassifitseeritud maakasutuskaardid.

### 3.1.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2015

Tallinna linna ja selle lähiümbruse analüüs näitab asulaalade väga suurt kasvu (tabel 4). 26 aastaga on asulaalad suurenenud 9417 hektarit ehk ligikaudu 70% (suhteline muutus). Asula laienemisel tuleb tähele panna, et Tallinn piirneb põhjast Tallinna lahega. Ajavahemikul 1989–2007 on selgelt näha linna laienemist rannikut mööda ning rohkem suunaga Tallinna linnast ida poole. Antud suunas kulgeb ka suur Tallinna linna läbiv põhimaantee. Sama trend jätkus ka aastatel 2007–2015, kuid nüüd võttes rohkem suuna rannikut mööda Tallinna linnast lääne poole.

**Tabel 4.** Tallinna linna ja linnalähipiirkonna klassifitseeritud alade kuue maakasutustüübi statistika kokkuvõte aastatel 1989, 2007 ja 2015.

Maakasutus	1989		2007		2015		Suhteline muutus 1989-2015 %
	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	
Märgala	603.03	0.76	807.93	1.02	653.22	0.83	8.32
Asula	13453.38	17.00	20237.94	25.57	22869.59	28.90	69.99
Põllu- ja rohumaa	29210.40	36.91	22760.28	28.76	22243.59	28.11	-23.85
Metsamaa	18644.13	23.56	18769.23	23.72	17515.35	22.13	-6.05
Tehisala	353.43	0.45	268.74	0.34	243.09	0.31	-31.22
Veekogu	16873.38	21.32	16299.63	20.59	15619.05	19.74	-7.43

Asulaalad on põhiliselt suurenenud põllu- ja rohumaa ning vähesel määral ka metsamaa arvelt. Põllu- ja rohumaa pindala on 26 aastaga vähenenud 6967 hektarit (tabel 5) ehk ligikaudu 24%, suurim oli vähenemine just esimesel vaadeldaval perioodil, mil põllu- ja rohumaa pindala vähenes 6450 hektarit. Põllu- ja rohumaa vähenemine toimus põhiliselt asula aga vähesel määral ka metsamaa arvelt. Metsamaa vähenes vaadeldaval perioodil kokku 1129 hektarit ehk 6%. Esimesel vaadeldaval perioodil metsamaa kasvas 125 hektarit aga viimasel perioodil vähenes rohkem kui 10 korda rohkem ehk 1254 hektarit. Uuritaval alal on tehisala olnud pidevas kahanemises, vähenedes 26 aastaga kokku 111 hektarit. Märgala muutust tuleks vaadelda kriitiliselt, sest antud ala maht on olnud väga kõikuv, esimesel perioodil kasvades ning teisel vähenedes.

**Tabel 5.** Kuue maakasutustüübi muutuste dünaamika Tallinna linnas ja selle lähiümbruses. Positiivsed ja negatiivsed numbrid näitavad pindalalist juurdekasvu ja vähenemist.

Maakasutus	Pindala ha		Kokku
	1989–2007	2007–2015	
<b>Märgala</b>	199	-155	44
<b>Asula</b>	6785	2632	9417
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	-6450	-517	-6967
<b>Metsamaa</b>	125	-1254	-1129
<b>Tehisala</b>	-85	-26	-111
<b>Veekogu</b>	-574	-681	-1255

### 3.1.3 Maakasutusmuutuste modelleerimine

Maakasutusmuutuste analüüs näitas põllu- ja rohumaa ning metsamaa muutumist asulaks, seega võeti modelleerimisel aluseks antud üleminekud. Tallinna asulaalade modelleerimisel võeti arvesse kuute tegurit: kõrgusmudel, kaugus teedest, kaugus veekogust (nii siseveekogud kui ka meri), kaugus olemasolevast asutusest 1989 aastal, kaugus administratiivpiirist ja maakasutus (lisa 1). Kaugus teedes ning asutusest on mõlemad dünaamilised tegurid ning kõik ülejäänud staatilised. Visuaalse vaatlus põhjal järeldati, et üleminekuid mõjutavad samad tegurid, seega koondati üleminekud kokku üheks.

Tabelis 6 on ära toodud iga loodud teguri seosekordaja Crameri V väärtused. Antud juhul on näha, et vaid ühe teguri väärtus on suurem kui 0,4 ja selleks on maakasutus ehk tegemist on hea teguriga. Viie teguri väärtused jäävad üle 0,15 ehk tegemist on ülemineku modelleerimisel kasulike teguritega. Mudeli hilisema valideerimise põhjal võib öelda, et valitud tegureid ei ole vaja modifitseerida. Tegurite põhjal koostatud üleminekupotentsiaali kaartidel on kõige tõenäolisemalt mõlema ülemineku puhul muutumas administratiivpiiri lähedale jäävad alad (lisa 2). Samuti eristuvad selgelt olemasoleva asutusega piirnevad alad, mille muutumise tõenäosus on samuti kõrge. Kõige vähem tõenäoliselt on muutumas suured metsamassiivid ning olemasolevast asutusest kaugemale jäävad alad.



**Tabel 6.** Tallinna linna ja selle lähiümbruse asulaalade ülemineku tegurite Crameri V väärtused.

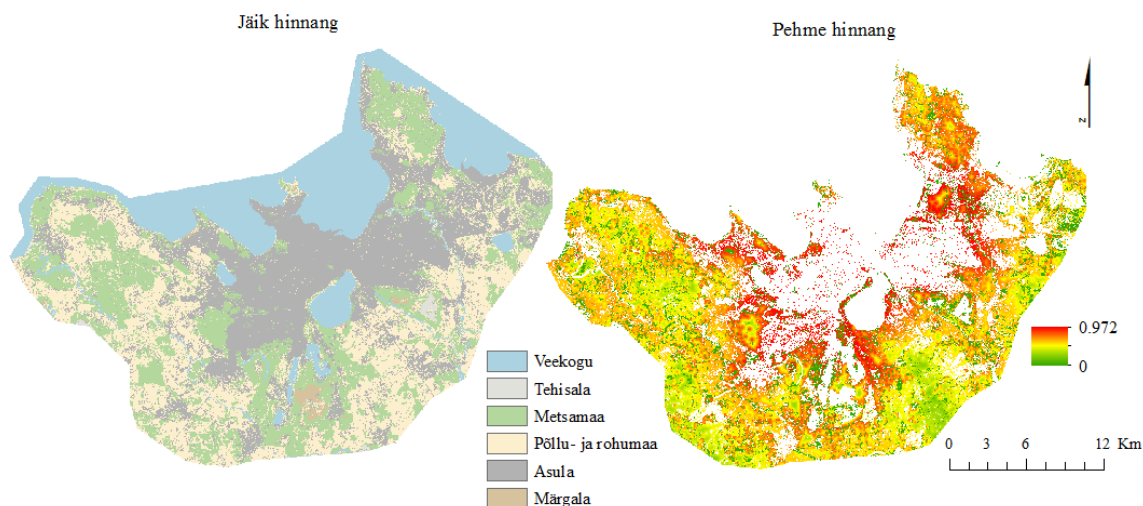
<b>Tegurid</b>	<b>Crameri V</b>
<b>Kõrgusmudel</b>	0.2131
<b>Maakasutus</b>	0.658
<b>Kaugus administratiivpiirist</b>	0.2168
<b>Kaugus olemasolevast asustusest 1989</b>	0.2498
<b>Kaugus teedest</b>	0.2072
<b>Kaugus veekogust</b>	0.2954

Maakasutusmuutuste üleminekutõenäosused perioodidel 1989–2007 ja 2007–2015 on toodud tabelis 7. Maatriks näitab, et veekogu ja asula klassid on olnud uurimisperioodide vältel stabiilsed, jäädes suures ulatuse samasse maakasutusklassi mõlemal vaatlusperioodil, mida näitab ühe lähedale jääv väärtus diagonaalil. Kõige vähem püsivad klassid on olnud tehisala ja märgala, mida näitab madal üleminekutõenäosus. Märgala muutus aga osaliselt põllu- ja rohumaaaks.

**Tabel 7.** Tallinna linna ja selle lähiümbruse ülemineku tõenäosuste maatriks perioodideks 1989–2007 ja 2007–2015.

<b>Maakasutus</b>	<b>Aasta</b>	<b>Veekogu</b>	<b>Tehisala</b>	<b>Metsamaa</b>	<b>Põllu- ja rohumaa</b>	<b>Asula</b>	<b>Märgala</b>
<b>Veekogu</b>	1989–2007	<b>0.9813</b>	0.0001	0	0.0172	0.0012	0.0003
	2007–2015	<b>0.8968</b>	0.0001	0.0095	0.0478	0.0328	0.0131
<b>Tehisala</b>	1989–2007	0.0086	<b>0.7431</b>	0.019	0.1894	0.0278	0.012
	2007–2015	0.0138	<b>0.4532</b>	0.0775	0.3564	0.0623	0.0369
<b>Metsamaa</b>	1989–2007	0.0005	0.0007	<b>0.8955</b>	0.0743	0.0259	0.0031
	2007–2015	0.002	0.0019	<b>0.6463</b>	0.2771	0.0711	0.0015
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	1989–2007	0.0003	0.0008	0.0791	<b>0.8177</b>	0.0956	0.0066
	2007–2015	0.0131	0.0022	0.1423	<b>0.5276</b>	0.3091	0.0057
<b>Asula</b>	1989–2007	0.002	0.0025	0.039	0.12	<b>0.8365</b>	0
	2007–2015	0.0044	0.0003	0.0468	0.1715	<b>0.7759</b>	0.001
<b>Märgala</b>	1989–2007	0.0483	0.0093	0.0048	0.1402	0	<b>0.7973</b>
	2007–2015	0.0092	0.0122	0.1759	0.4301	0.1502	<b>0.2223</b>

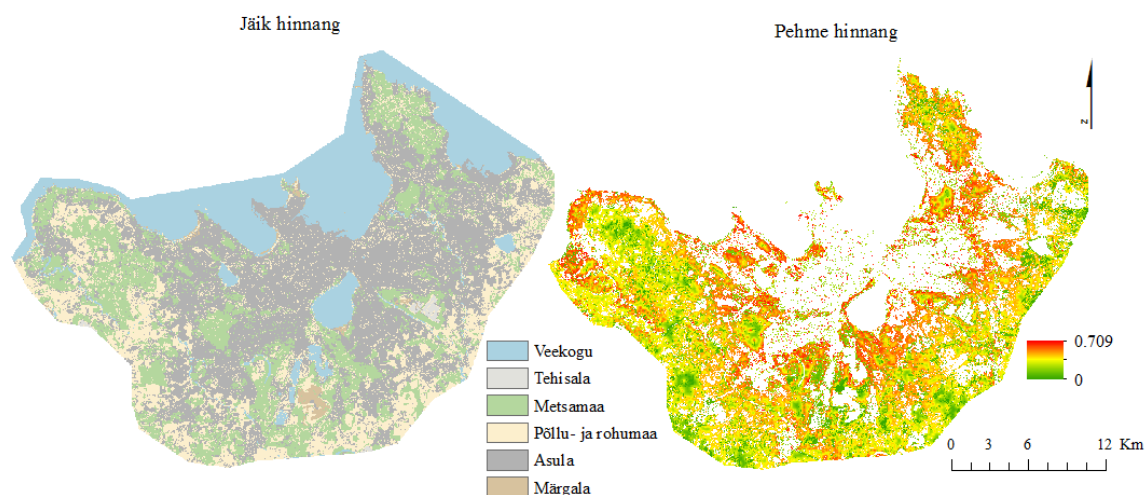
Esimene modelleerimine tehti aastaks 2015 ning joonisel 7 on ära toodud nii pehme kui ka jäik hinnang. Pehme prognoos näitab, et suur osa Tallinna linna lähiümbrusest omab suhteliselt suurt tõenäosust muutumiseks. Kõige suurem on see olemasoleva asutuse ja administratiivpiiri lähedastel aladel. Kõige väiksem tõenäosus muutumiseks on aladel, mis asuvad kõige kaugemal veekogudest (nii siseveekogudest kui ka merest) ning kus puudub suurem teede võrgustik.



**Joonis 7.** Tallinna linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2015.

2015. aasta modelleeritud jäiga hinnangu valideerimisel saadi kapa indeksiks 84,83%, üldiseks kapaks 86,54% ja asukoha kapa indeksiks 85,79%. Pehme hinnangu valideerimisel saadi täpsuseks 85%, mis on kõrgem soovitatud täpsuse väärtusest. Kõik saadud tulemused näitasid, et mudel on piisavalt täpne, et teha samu tegureid kasutades modelleerimine aastaks 2030. Kasutatavad tegurid jäid samaks, kuid nüüd kasutati kaugust 2007. aastal olemas olnud asustusest.

Joonisel 8 on ära toodud modelleeritud pehme ja jäik hinnang aastaks 2030. Pehmelt hinnangult on näha, et kõige tõenäolisemalt muutuvad rannikuäärsed alad ning olemasoleva asulate lähedased olevad alad. Kõige ebatõenäolisemalt just siseveekogudest ja suurematest teedest eemal asuvad alad. Pehme hinnangu puhul aga tuleb tähele panna, et suurimaks tõenäosuse väärtuseks on vaid 0,709. Jäiga hinnangu põhjal võib öelda, et 6875 hektarit põllu- ja rohumaaast ning 1245 hektarit metsamaast muutuvad 2030. aastaks tõenäoliselt asulaalaks.

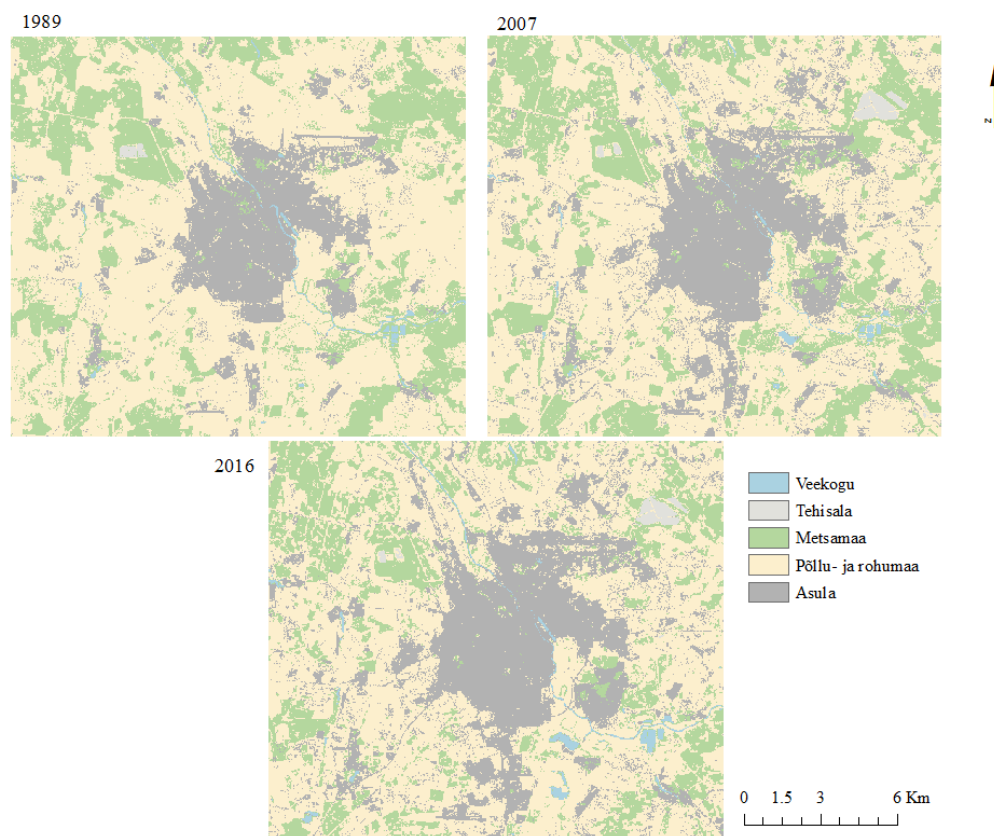


**Joonis 8.** Tallinna linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2030.

## 3.2 Tartu

### 3.2.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine

Kolme uurimisperioodi klassifitseeritud kaardid on ära toodud joonisel 9. Tartu puhul ei klassifitseeritud eraldi märgala, sest satelliidipiltidel ei eristunud ta selgelt ning oleks sisse toonud liialt palju vigu. Kokku hõlmab uuritav ala natuke rohkem kui 28061 hektarit. Tehisala moodustasid Ulila turbaväli ja Möllatsi turbamaardla. Täpsuse hindamise tulemused on koondatud tabelisse 8. Tulemused näitavad, et üldine täpsus ja Kapa kordaja olid kõigi klassifitseeritud kaartide puhul suuremad minimaalsest soovitatavast täpsusest (85%), mida kasutatakse maakasutusmuutuste analüüsimisel ja modelleerimisel. Samuti jääb nii kasutaja kui ka tootja täpsus enamasti kõrgemale 85%, ainult 2007. aastal jääb kasutaja täpsus põllu- ja rohumaa ning tootja täpsus asula puhul alla selle, kuid vaid väga vähesel määral.



**Joonis 9.** Tartu linna ja selle lähiümbruse kolme vaadeldava perioodi klassifitseeritud maakasutuskaardid.

**Tabel 8.** Tartu maakasutuskaartide 1989., 2007. ja 2016. aasta veamaatriksi kokkuvõte.

Maakasutus	Tootja täpsus			Kasutaja täpsus		
	1989	2007	2016	1989	2007	2016
<b>Veekogu</b>	0.90	0.88	0.98	1.00	1.00	1.00
<b>Tehisala</b>	0.80	1.00	0.90	1.00	1.00	1.00
<b>Metsamaa</b>	0.93	0.98	0.91	0.93	0.96	0.89
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	0.90	0.98	0.92	0.88	0.83	0.87
<b>Asula</b>	0.98	0.83	0.95	0.89	0.96	0.99
Maakasutuskaart	<b>1989</b>	<b>2007</b>		<b>2016</b>		
<b>Üldine täpsus</b>	0.92	0.92		0.94		
<b>Kapa</b>	0.89	0.89		0.92		

### 3.2.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2016

Tartu linna ja selle lähiümbruse analüüs näitab asulaalade kasvu (tabel 9). 27 aastaga on asulaalad suurenenud 2822 hektari võrra ehk ligi 70% (suhteline muutus). Ajavahemikul 1989–2007 on asula laienemine toimunud põhiliselt Tartu linnast lõuna, põhja ning lääne suunas. Antud suundadesse asuvad suuremad Tartu linna läbivad põhimaanteed, mis teeb need alad hea ligipääsu tõttu ihaldusväärseteks elupiirkondadeks. Aastatel 2007–2016 on kasv kõige suurem olnud lõuna suunas. Seega aastatel 1989–2016 on kasv olnud kõigis suundades, aga ülekaal on siiski lõuna suunas.

**Tabel 9.** Tartu linna ja linnalähipiirkonna klassifitseeritud alade kuue maakasutustüübi statistika kokkuvõte aastatel 1989, 2007 ja 2016.

Maakasutus	1989		2007		2016		Suhteline muutus 1989-2016 %
	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	
Asula	4082.94	14.55	5816.79	20.73	6905.16	24.61	69.12
Põllu- ja rohumaa	17340.84	61.80	15413.04	54.93	15638.85	55.73	-9.81
Metsamaa	6407.28	22.83	6482.88	23.10	5068.80	18.06	-20.89
Tehisala	49.86	0.18	182.70	0.65	154.44	0.55	209.75
Veekogu	179.28	0.64	164.79	0.59	292.95	1.04	63.40

Asulaalad on suurenenud põhiliselt põllu- ja rohumaa arvelt ning vähesel määral ka metsamaa arvelt. Põllu- ja rohumaa pindala on 27 aastaga vähenenud 1702 hektarit (tabel 10) ehk ligikaudu 10%. Aastatel 1989–2007 põllu- ja rohumaa pindala vähenenud 1928 hektarit aga aastatel 2007–2016 kasvanud 226 hektarit. Põllu- ja rohumaa vähenes esimesel perioodil asula ning metsamaa laienemise tõttu ning teisel perioodil kasvas metsamaa vähenemise tõttu. Kokku on metsamaa vähenenud 1338 hektarit ehk 21%. Tehisala ja veekogud suurenesid mõlemad ligikaudu 100 hektari võrra.

**Tabel 10.** Viie maakasutustüübi muutuste dünaamika Tartu linnas ja selle lähiümbruses. Positiivsed ja negatiivsed numbrid näitavad pindalalist juurdekasvu ja vähenemist.

Maakasutus	Pindala ha		Kokku
	1989–2007	2007–2016	
<b>Asula</b>	1734	1088	2822
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	-1928	226	-1702
<b>Metsamaa</b>	76	-1414	-1338
<b>Tehisala</b>	133	-28	105
<b>Veekogu</b>	-14	128	114

### 3.2.3 Maakasutusmuutuste modelleerimine

Maakasutusmuutuste analüüs näitas põllu- ja rohumaa ning metsamaa muutumist asulaks, seega võeti modelleerimisel aluseks antud üleminekud. Tartu asulaalade modelleerimisel võeti arvesse viite tegurit: kaugus teedest, kaugus veekogust, kaugus olemasolevast asutusest aastal 1989, kaugus administratiivpiirist ja maakasutus (lisa 3). Viiest tegurist kolm on staatilised ja kaks dünaamilised. Dünaamilisteks on kaugus teedest ning asutusest, mis arvutati uuritava perioodi jooksul nii asutuse kui ka teede kasvades ümber. Visuaalse vaatluse põhjal järeldati, et kahte üleminekut mõjutasid samad tegurid, aga ülemineku potentsiaali mudeli koostamisel ei saavutatud piisavat täpsust ning seetõttu eraldati üleminekud kaheks. Metsamaa muutumisel asulaks olid olulisteks teguriteks kaugus olemasolevast asutusest, teedest ja veekogust. Põllu- ja rohumaa muutumisel asulaks olid olulisteks aga maakasutus, kaugus olemasolevast asutusest, administratiivpiirist ja teedest.

Tabelis 11 on ära toodud iga teguri seosekordaja Crameri V väärtused. Antud juhul on näha, et kolme teguri väärtused on suuremad kui 0,4 ehk tegemist on heade teguritega. Kaugus teedest väärtus on küll alla 0,4 aga siiski suurem kui 0,15. Napilt sellest alla jääb kaugus veekogust, kuid metsamaa muutumisel asulaks oli selle mõju visuaalselt näha. Põllu- ja rohumaa muutumine asulaks toimus suuremas mahu ning seetõttu ei avaldunud veekogu mõju metsamaa muutumisele seosekordajas. Tegurite põhjal koostatud üleminekupotentsiaali kaartidel on metsamaast kõige tõenäolisemad muutuma olemasoleva asutuse ääres paiknevad alad (lisa 4). Põllu- ja rohumaa aga Tartu linna administratiivpiiri ääres olevad alad ning selgelt tuleb välja teede mõju asutuse laienemisele.

**Tabel 11.** Tartu linna ja selle lähiümbruse asulaalade ülemineku tegurite Crameri V väärtused.

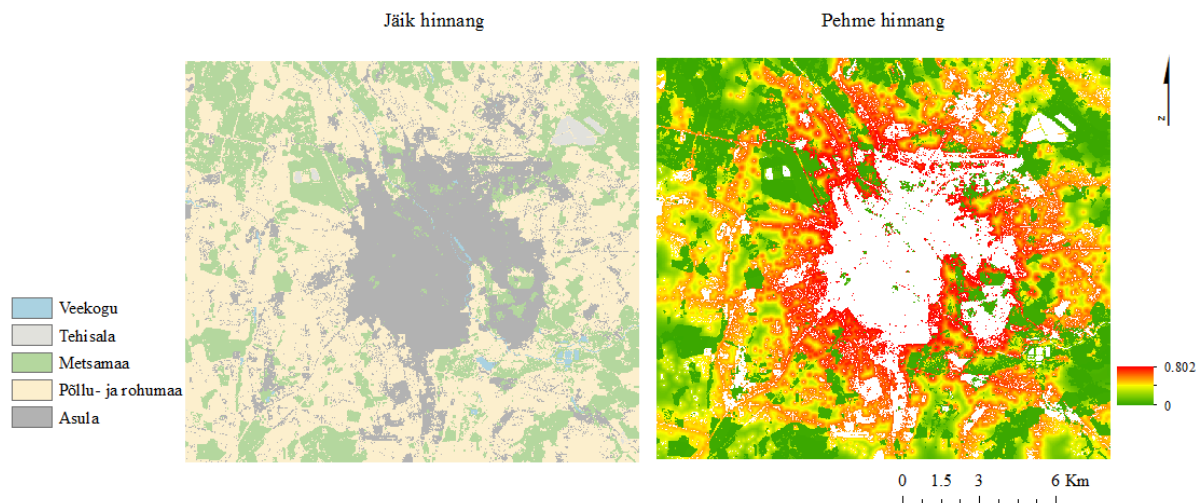
Tegurid	Asula
Maakasutus	0.8048
Kaugus administratiivpiirist	0.5496
Kaugus olemasolevast asustusest 1989	0.8199
Kaugus teedest	0.3896
Kaugus veekogust	0.1448

Maakasutusmuutuste ülemineku tõenäosused perioodidel 1989–2007 ja 2007–2016 on toodud tabelis 12. Maatriks näitab, et veekogu ja asula klassid on olnud stabiilsed, jäädes samasse maakasutusklassi mõlemal vaatlusperioodil, mida näitab 1.0 lähedane ülemineku maatriksi tõenäosus. Tehisalade ja metsamaa madal üleminekutõenäosus näitab, et antud klass on kõige vähem püsivam. Tehisala väikest üleminekutõenäosust põhjustas uute turbaväljade teke.

**Tabel 12.** Tartu linna ja selle lähiümbruse ülemineku tõenäosuste maatriks perioodideks 1989–2007 ja 2007–2016.

Maakasutus	Aasta	Veekogu	Tehisala	Metsamaa	Põllu- ja rohumaa	Asula
Veekogu	1989–2007	<b>0.818</b>	0.0061	0.0195	0.1043	0.052
	2007–2016	<b>0.9915</b>	0	0.0008	0.0034	0.0043
Tehisala	1989–2007	0.0041	<b>0.5582</b>	0.1487	0.289	0
	2007–2016	0.0353	<b>0.7335</b>	0.0834	0.14	0.0078
Metsamaa	1989–2007	0.0015	0.0193	<b>0.8687</b>	0.1088	0.0017
	2007–2016	0.0089	0.0001	<b>0.5196</b>	0.4492	0.0222
Põllu- ja rohumaa	1989–2007	0.0009	0	0.0521	<b>0.8963</b>	0.0507
	2007–2016	0.0086	0.0004	0.0714	<b>0.8192</b>	0.1003
Asula	1989–2007	0	0	0.01	0.06	<b>0.93</b>
	2007–2016	0	0	0.02	0.08	<b>0.9</b>

Esimene modelleerimine tehti aastaks 2016 ning joonisel 10 on ära toodud nii pehme kui ka jäik hinnang. Pehme prognoos näitab, et kõige suurem tõenäosus muutuseks on administratiivpiiri äärsetel aladel. Olemasoleva asustuse ja teede lähedal paiknevate alade muutumise tõenäosus on keskmine. Kõige väiksem oli tõenäosus muutumiseks tehisala ümbritsevatel aladel ning suurtel metsamassiividel.

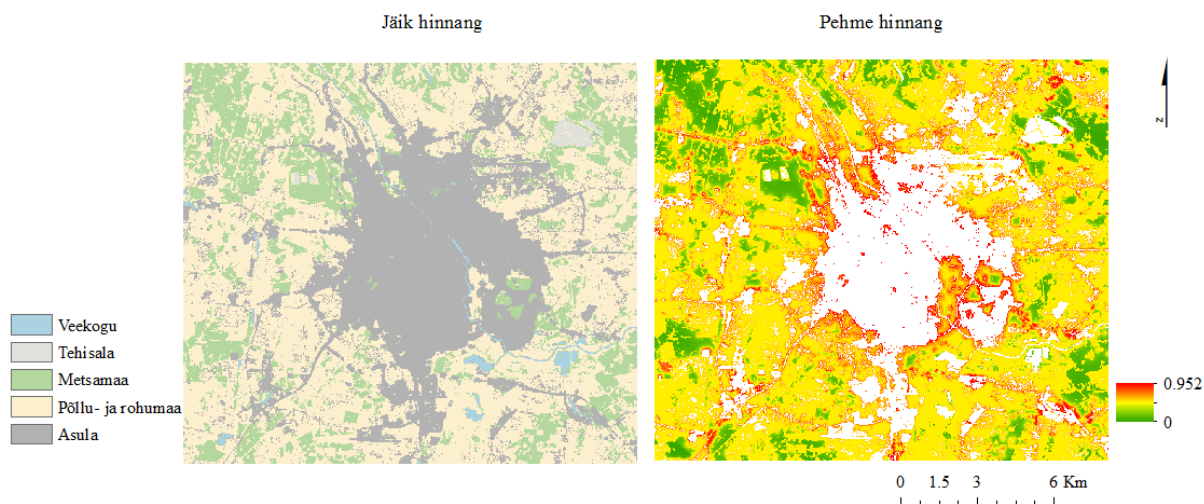


**Joonis 10.** Tartu linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2016.

2016. aasta modelleeritud jäiga hinnangu valideerimisel saadi kapa indeksiks 73,77%, üldiseks kapa indeksiks 80,01% ja asukoha kapa indeksiks 80,51%. Pehme hinnangu valideerimisel saadi täpsuseks 83,7%, mis on kõrgem soovitatud täpsuse väärtusest. *VALIDATE* mooduliga saadud tulemused on piiripealsed aga veel piisavalt head, et teha samu tegureid kasutades modelleerimine aastaks 2030. Tegurid ei muutunud, aga nüüd kasutati kaugust 2007. aastal olemas olnud asutusest.

Joonisel 11 on ära toodud modelleeritud pehme ja jäik hinnang aastaks 2030. Pehmelt hinnangult on näha, et enamik Tartu linna ja selle lähiümbrust omab keskmiselt suuremat tõenäosust muutumiseks. Kõige suurem on tõenäosus muutumiseks administratiivpiiri ja teede lähedastel aladel. Keskmise on tõenäosus muutumiseks kõigil Tartu linna lähedastel põllu- ja rohumaaal. Kõige madalam on tõenäosus muutumiseks tehisala äärsetel metsadel ning linnast loodes asuvatel suurtel metsamassiividel. Jäiga hinnangu põhjal võib öelda, et 1568 hektarit põllu- ja rohumaaast ning 112 hektarit metsamaast muutuvad 2030. aastaks tõenäoliselt asulaalaks.



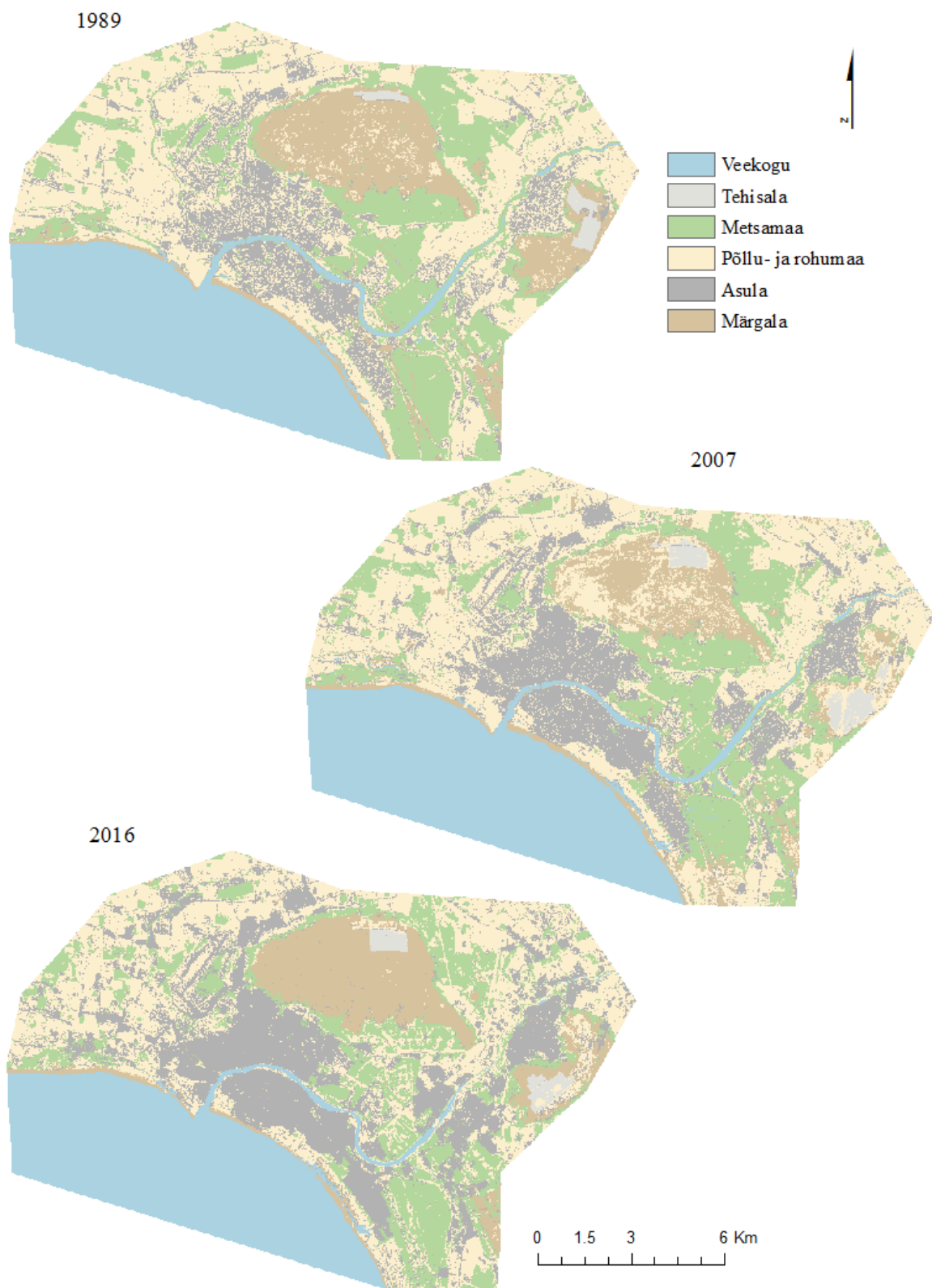


**Joonis 11.** Tartu linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2030.

### 3.3 Pärnu

#### 3.3.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine

Kolme uurimisperioodi klassifitseeritud kaardid on ära toodud joonisel 12. Erinevalt Tartust klassifitseeriti siin eraldi märgala, mis selgelt eraldus satelliidipiltidelt. Kokku hõlmas uurimisala natuke rohkem kui 20127 hektarit. Täpsuse hindamise tulemused on koondatud tabelisse 13. Tulemused näitavad, et üldine täpsus ja Kapa kordaja olid kõigi klassifitseeritud kaartide puhul suuremad minimaalsest soovitatavast täpsusest. Vaadeldes aga tootja ja kasutaja täpsust on näha, et seal esineb ka väärtusi, mis jäävad alla 85% (minimaalne soovitatav täpsus). Tootja täpsuse puhul on tegemist märgalaga ja kasutaja täpsuse puhul on tegemist põllu- ja rohumaa 2007. aastal. Mõlema madala väärtuse põhjuseks on märgala klassifitseerimise täpsus, mis klassifitseerus põllu- ja rohumaa.



**Joonis 12.** Pärnu linna ja selle lähiümbruse kolme vaadeldava perioodi klassifitseeritud maakasutuskaardid.

**Tabel 13.** Pärnu maakasutuskaartide 1989., 2007. ja 2016. aasta veamaatriksi kokkuvõte.

Maakasutus	Tootja täpsus			Kasutaja täpsus		
	1989	2007	2016	1989	2007	2016
<b>Veekogu</b>	0.92	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00
<b>Tehisala</b>	1.00	0.98	0.90	1.00	1.00	1.00
<b>Metsamaa</b>	1.00	0.90	0.97	0.92	0.98	1.00
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	0.98	0.92	0.83	0.84	0.70	0.81
<b>Asula</b>	0.90	0.98	0.98	0.96	0.94	0.86
<b>Märgala</b>	0.90	0.67	0.97	1.00	0.91	0.98
Maakasutuskaart	<b>1989</b>	<b>2007</b>	<b>2016</b>			
<b>Üldine täpsus</b>	0.95	0.91	0.94			
<b>Kapa</b>	0.94	0.89	0.92			

### 3.3.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2016

Pärnu linna ja selle lähiümbruse analüüs näitab asulaalade ning vähesel määral ka tehisala kasvu (tabel 14). 27 aastaga on asulaalad suurenenud 2169 hektarit ehk 80% (suhteline muutus). Ajavahemikul 1989–2007 on asula laienemine Pärnus toimunud linna administratiivpiiri lähistel võrdselt kõigis suundades. Aastatel 2007–2016 on kasv koondunud põhi- ja tugimaanteede äärde ning selgelt tuleb välja ka ranniku mõju asula laienemisele.

**Tabel 14.** Pärnu linna ja linnalähipiirkonna klassifitseeritud alade kuue maakasutustüübi statistika kokkuvõte aastatel 1989, 2007 ja 2016.

Maakasutus	1989		2007		2016		Suhteline muutus 1989-2016 %
	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	
<b>Märgala</b>	2413.08	11.99	1786.59	8.88	2153.16	10.70	-10.77
<b>Asula</b>	2681.19	13.32	3534.30	17.56	4850.28	24.10	80.90
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	6654.87	33.06	6560.19	32.59	5430.96	26.98	-18.39
<b>Metsamaa</b>	3855.06	19.15	3586.05	17.82	3182.04	15.81	-17.46
<b>Tehisala</b>	156.15	0.78	252.18	1.25	173.61	0.86	11.18
<b>Veekogu</b>	4366.98	21.70	4408.02	21.90	4337.28	21.55	-0.68

Asulaalad on suurenenud põhiliselt põllu- ja rohumaa ning vähesel määral ka metsamaa arvelt. Põllu- ja rohumaa pindala on 27 aastaga vähenenud 1224 hektarit (tabel 15) ehk 18%, suurim oli vähenemine just viimasel vaadeldaval perioodil, mil põllu- ja rohumaa pindala vähenes 1129 hektarit. Põllu- ja rohumaa vähenes asula arvelt, aga kasvas perioodil 1989–2016 nii metsamaa

kui ka tehisala arvelt kokku 557 hektarit. Metsamaa vähenes kokku 673 hektarit ehk 17%. Tehisala oli lisaks asulale ainuke kasvav ala, kasvades 17 hektarit ehk 10%. Märgala vähenes perioodil 1989–2007 626 hektarit ning 2007–2016 suurenes 367 hektarit, mis osaliselt tulenes märgala klassifitseerumisest põllu- ja rohumaaaks kuiva perioodi tõttu.

**Tabel 15.** Viie maakasutustüübi muutuste dünaamika Pärnu linnas ja selle lähiümbruses. Positiivsed ja negatiivsed numbrid näitavad pindalalist juurdekasvu ja vähenemist.

Maakasutus	Pindala ha		Kokku
	1989–2007	2007–2016	
<b>Märgala</b>	-626	367	-259
<b>Asula</b>	853	1316	2169
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	-95	-1129	-1224
<b>Metsamaa</b>	-269	-404	-673
<b>Tehisala</b>	96	-79	17
<b>Veekogu</b>	41	-71	-30

### 3.3.3 Maakasutusmuutuste modelleerimine

Maakasutusmuutuste analüüs näitas põllu- ja rohumaa ning metsamaa muutumist asulaks, seega võeti modelleerimisel aluseks antud üleminekud. Pärnu asulaalade modelleerimisel võeti arvesse kuute tegurit: kõrgusmudel, kaugus põhiteedest, kaugus administratiivpiirist, kaugus veekogudest (nii siseveekogud kui ka meri), kaugus olemasolevast asutusest aastal 1989 ja maakasutus (lisa 5). Kõik tegurid, välja arvatud kaugus olemasolevast asutusest olid staatilised ning suure tõenäosusega aja jooksul ei muutu. Kaugus asutusest on dünaamiline tegur ja seda arvutati uuritava perioodi jooksul asutuse kasvades ümber. Et teed eraldati põhimaanteedest ja liigitati põhi-, kõrval ning tugimaanteedeks, siis neist esimese puhul ei ole tegemist dünaamilise teguriga kuna aja jooksul nad ei laiene vaid jäävad samaks. Visuaalsel vaatluse põhjal võis järeldada, et mõlemat üleminekut mõjutasid samad tegurid, seega modelleerimisel koondati üleminekud kokku üheks.

Tabelis 16 on ära toodud iga loodud teguri seosekordaja Crameri V väärtused. Antud juhul on näha, et enamike tegurite väärtused on suuremad kui 0,4 ehk tegemist on heade teguritega ning ülejäänud on suuremad kui 0,15 ehk samuti kasulikud. Seega kõik valitud tegurid on olulised ja peaksid modelleerimise läbiviimisel leidma kaalumist. Tegurite põhjal koostatud üleminekupotentsiaali kaartidel on kõige tõenäolisemad muutuma olemasoleva asutuse ääres

paiknevad alad (lisa 6). Lisaks eristuvad selgelt põhiteede ja veekogude äärsed alad, mille tõenäosus muutumiseks on samuti suur.

**Tabel 16.** Pärnu linna ja selle lähiümbruse asulaalade ülemineku tegurite Crameri V väärtused.

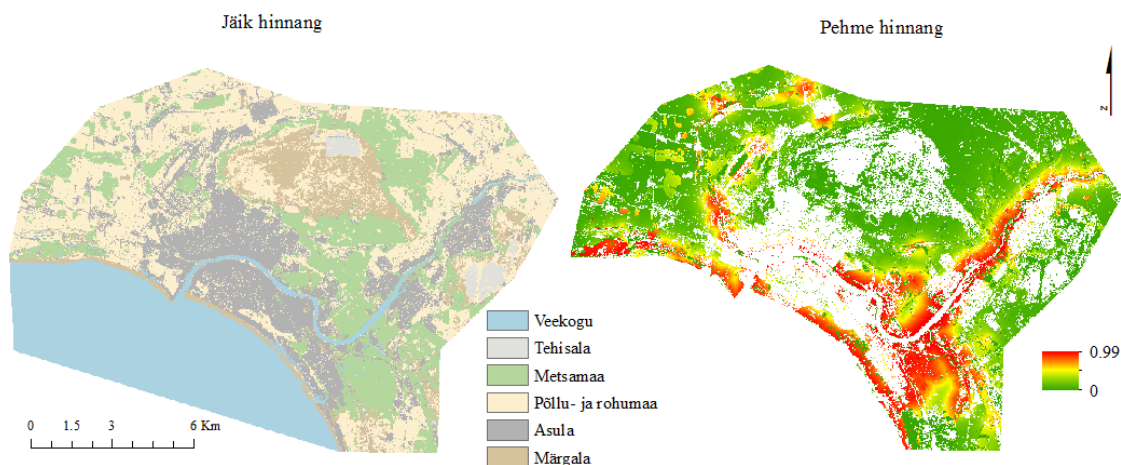
<b>Tegurid</b>	<b>Crameri V</b>
<b>Kõrgusmudel</b>	0.4312
<b>Maakasutus</b>	0.6918
<b>Kaugus administratiipiirist</b>	0.4127
<b>Kaugus olemasolevast asustusest 1989</b>	0.5282
<b>Kaugus põhiteedest</b>	0.358
<b>Kaugus veekogudest</b>	0.3378

Maakasutusmuutuste ülemineku tõenäosused perioodidel 1989–2007 ja 1989–2016 on toodud tabelis 17. Maatriks näitab, et veekogu ja asula klassid on olnud stabiilsed, jäädes samasse maakasutusklassi mõlemal vaatlusperioodil, mida näitab 1.0 lähedane ülemineku maatriksi tõenäosus. Paksus kirjas numbrid diagonaalil näitavad maakasutusklassi üleminekutõenäosusi. Tehisalade madal üleminekutõenäosus näitab, et antud klass on kõige vähem püsivam ning seda põhjustab tehisalade asukoha muutumine.

**Tabel 17.** Ülemineku tõenäosuste maatriks perioodideks 1989–2007 ja 2007–2016.

<b>Maakasutus</b>	<b>Aasta</b>	<b>Veekogu</b>	<b>Tehisala</b>	<b>Metsamaa</b>	<b>Põllu- ja rohumaa</b>	<b>Asula</b>	<b>Märgala</b>
<b>Veekogu</b>	1989–2007	<b>0.9917</b>	0	0.0001	0.0007	0.0004	0.007
	2007–2016	<b>0.9647</b>	0	0.003	0.02	0.0051	0.0072
<b>Tehisala</b>	1989–2007	0	<b>0.2334</b>	0	0.4974	0.0072	0.2619
	2007–2016	0	<b>0.4955</b>	0.0019	0.3067	0.0969	0.0991
<b>Metsamaa</b>	1989–2007	0.0078	0	<b>0.8596</b>	0.0895	0.0037	0.0395
	2007–2016	0.0002	0.0001	<b>0.6439</b>	0.2637	0.0476	0.0445
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	1989–2007	0.0016	0.0026	0.0389	<b>0.8625</b>	0.0639	0.0305
	2007–2016	0.0006	0.0041	0.0855	<b>0.5611</b>	0.2021	0.1467
<b>Asula</b>	1989–2007	0	0	0.0058	0.011	<b>0.9832</b>	0
	2007–2016	0	0	0.003	0.032	<b>0.965</b>	0
<b>Märgala</b>	1989–2007	0.0078	0.0947	0.0645	0.1905	0	<b>0.6425</b>
	2007–2016	0.0344	0.0009	0.1079	0.1974	0.0666	<b>0.5928</b>

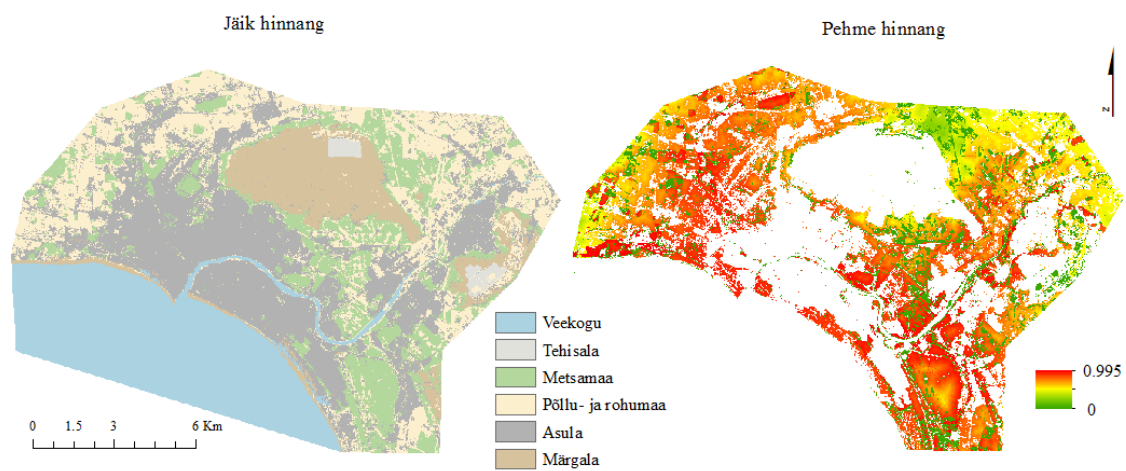
Esimene modelleerimine tehti aastaks 2016 ning joonisel 13 on ära toodud nii pehme kui ka jäik hinnang. Pehme prognoos näitab, et kõige suurem tõenäosus muutuseks on Pärnu jõe ja lahe äärsetel aladel. Kõige väiksem oli tõenäosus märgala ümbritsevatel aladel ning metsamaadel. Põllu- ja rohumaadest on kõige tõenäolisemad muutuma olemasoleva asutusega piirnevad alad.



**Joonis 13.** Pärnu linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2016.

2016. aasta modelleeritud jäiga hinnangu valideerimisel saadi kapa indeksiks 81,37%, üldiseks kapa indeksiks 82,48% ja asukoha kapa indeksiks 86,03%. Pehme hinnangu valideerimisel saadi täpsuseks 82%, mis on kõrgem soovitatud täpsuse väärtusest. Kõik saadud tulemused näitasid, et mudel on piisavalt „hea“, et teha samu tegureid kasutades modelleerimine aastaks 2030. Kasutatavad tegurid jäid samaks, kuid nüüd kasutati kaugust 2007. aastal olemas olnud asustusest.

Joonisel 14 on ära toodud modelleeritud pehme ja jäik hinnang aastaks 2030. Pehmelt hinnangult on näha, et kõige tõenäolisemalt muutuvad lahe ja jõe äärsed alad, aga ka olemasoleva asustuse lähedal paiknevad alad. Kõige vähem tõenäolisemalt on muutumas Pärnust kirde pool asuvad suured metsamassiivid. Jäiga hinnangu põhjal võib öelda, et 1098 hektarit põllu- ja rohumaast ning 151 hektarit metsamaast muutuvad 2030. aastaks tõenäoliselt asulaalaks.



**Joonis 14.** Pärnu linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2030.

## 3.4 Narva

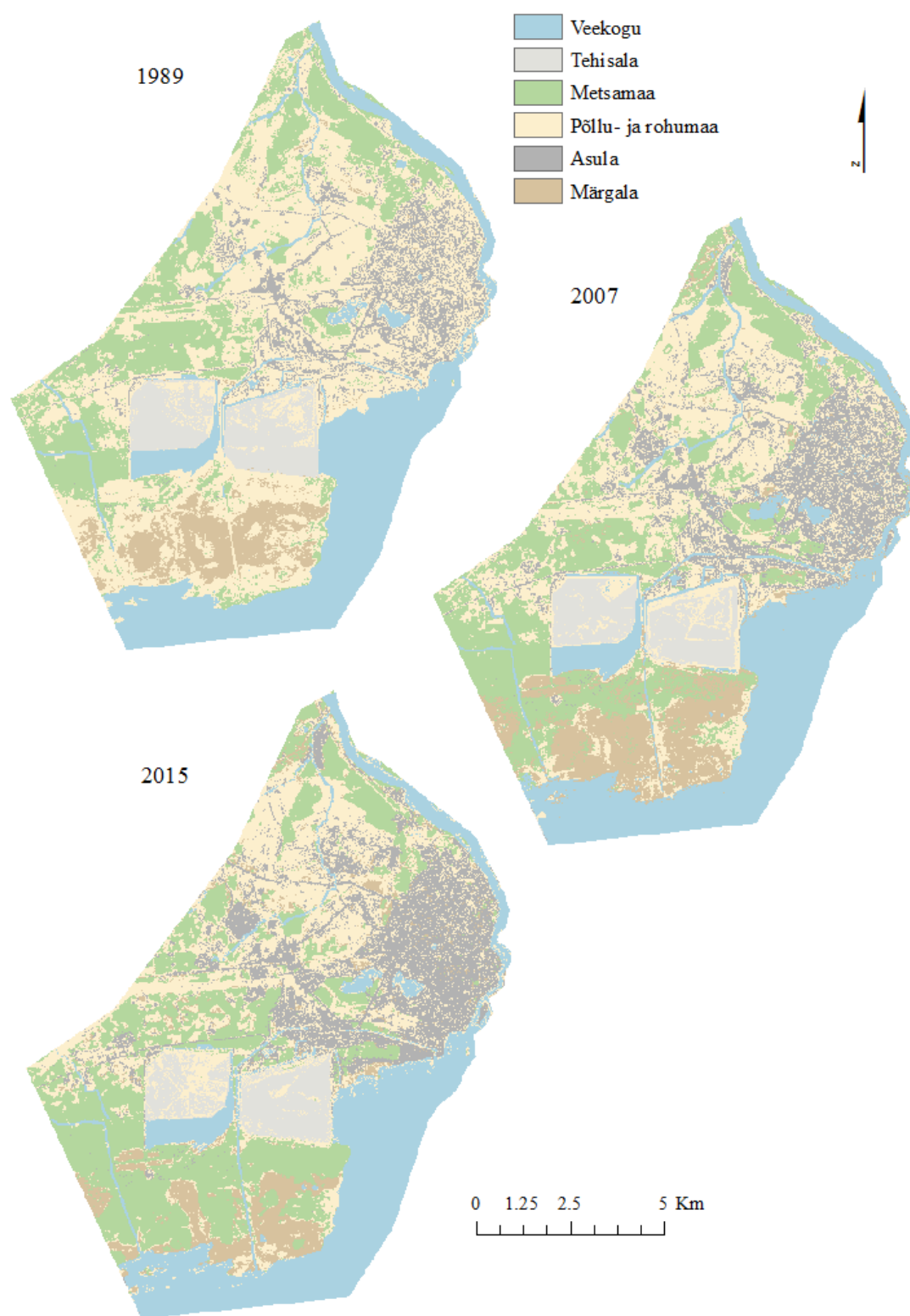
### 3.4.1 Maakasutuse klassifitseerimine ja täpsuse hindamine

Narva linna ja linnalähipiirkonna satelliidipiltidelt klassifitseerusid kõik määratud maakasutusklassid. Kokku hõlmas uuringuala natuke vähem kui 12302 hektarit. Narva puhul moodustasid tehisala Narva elektrijaama settebasseinid ning neid ümbritsev piirkond. Täpsuse hindamise tulemused on koondatud tabelisse 18 ning kolme uurimisperioodi klassifitseeritud kaardid joonisele 15. Tabelist on näha, et kaartide üldine täpsus ja Kapa kordaja on suuremad minimaalsest soovitatud täpsusest, aga 1989. aastal vaid väga napilt. Tootja ja kasutaja täpsust vaadates on näha, et suures osas viivad täpsuse alla märgala ning põllu- ja rohumaa. Märgala klassifitseerus põllu- ja rohumaaiks, viies nii tootja kui ka kasutaja täpsuse alla. Samuti on näha 2007. aasta juures asula tootja täpsust, mis samuti jääb alla soovitatava minimaalse väärtuse. Siinkohal on tegemist üksikute põllu- ja rohumaal paiknevate elamutega, mis segupikslite tõttu klassifitseerusid põllu- ja rohumaaiks.

**Tabel 18.** Narva maakasutuskaartide 1989., 2007. ja 2015. aasta veamaatriksi kokkuvõte.

Maakasutus	Tootja täpsus			Kasutaja täpsus		
	1989	2007	2015	1989	2007	2015
<b>Veekogu</b>	1.00	1.00	1.00	0.98	0.98	0.98
<b>Tehisala</b>	0.85	0.90	0.97	1.00	0.98	0.98
<b>Metsamaa</b>	0.88	0.95	0.98	0.87	0.95	0.89
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	0.88	0.92	0.92	0.65	0.69	0.73
<b>Asula</b>	0.87	0.73	0.82	0.95	0.90	0.92
<b>Märgala</b>	0.82	0.88	0.75	0.96	0.96	0.98
Maakasutuskaart	<b>1989</b>	<b>2007</b>	<b>2015</b>			
<b>Üldine täpsus</b>	0.88	0.90	0.91			
<b>Kapa</b>	0.86	0.88	0.89			





**Joonis 15.** Narva linna ja selle lähiümbruse kolme vaadeldava perioodi klassifitseeritud maakasutuskaardid.

### 3.4.2 Asustuse muutuste analüüs aastatel 1989, 2007 ja 2015

Narva linna ja selle lähiümbruse analüüs näitab asulaalade ja metsamaa kasvu (tabel 19). 26 aastaga on asulaalad suurenenud 1017 hektarit ehk rohkem kui 90% (suhteline muutus). Asula laienemise vaatlemisel tuleb tähele panna, et tegemist on piirilinnaga, mille laienemine üle piiri ei ole võimalik. Ajavahemikul 1989–2007 ning ka 2007–2015 on asula selgelt laienenud pikki põhimaateed ehk siis lääne suunas. Kuna antud ala piirab idast riigipiir, lõunast Peipsi järv ning sealsel rannikul asuv suur märgala ja põhjast meri, siis tegelikult ainsaks võimalikuks kasvu suunaks jäigi läänesuund.

**Tabel 19.** Narva linna ja linnalähipiirkonna klassifitseeritud alade kuue maakasutustüübi statistika kokkuvõte aastatel 1989, 2007 ja 2015.

Maakasutus	1989		2007		2015		Suhteline muutus 1989-2015 %
	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	
<b>Märgala</b>	724.23	5.89	1186.74	9.65	865.89	7.04	19.56
<b>Asula</b>	1040.22	8.46	1590.03	12.92	2057.40	16.72	97.79
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	4902.12	39.85	3403.71	27.67	3037.50	24.69	-38.04
<b>Metsamaa</b>	2279.79	18.53	2659.77	21.62	3075.84	25.00	34.92
<b>Tehisala</b>	729.72	5.93	653.58	5.31	617.04	5.02	-15.44
<b>Veekogu</b>	2625.93	21.35	2808.18	22.83	2648.34	21.53	0.85

Asulaalad on põhiliselt suurenenud põllu- ja rohumaa ning vähesel määral ka metsamaa arvelt. Põllu- ja rohumaa pindala on 26 aastaga vähenenud 1864 hektarit (tabel 20) ehk 38%, suurim oli vähenemine just esimesel vaadeldaval perioodil, mil põllu- ja rohumaa pindala vähenes 1498 hektarit. Põllu- ja rohumaa vähenes asula, märgala ja metsamaa arvelt ning kasvas väga vähesel määral tehisala arvelt. Metsamaa suurenes kokku 796 hektarit ehk ligikaudu 35%. Nii tehisala vähenemist kui ka märgala suurenemist tuleks vaadelda kriitiliselt, sest osaliselt tulenes see antud alade klassifitseerumisest põllu- ja rohumaaks. Eriti selgelt tuleb see välja märgala puhul, kus antud ala esimesel vaadeldaval perioodil kasvas 463 hektarit ning teisel perioodil vähenes 321 hektarit.

**Tabel 20.** Kuue maakasutustüübi muutuste dünaamika Narva linnas ja selle lähiümbruses. Positiivsed ja negatiivsed numbrid näitavad pindalalist juurdekasvu ja vähenemist.

Maakasutus	Pindala ha		Kokku
	1989–2007	2007–2015	
<b>Märgala</b>	463	-321	142
<b>Asula</b>	550	467	1017
<b>Põllu- ja rohumaa</b>	-1498	-366	-1864
<b>Metsamaa</b>	380	416	796
<b>Tehisala</b>	-76	-37	-113
<b>Veekogu</b>	182	-160	22

### 3.4.3 Maakasutusmuutuste modelleerimine

Maakasutusmuutuste analüüs näitas põllu- ja rohumaa ning metsamaa muutumist asulaks, seega võeti modelleerimisel aluseks antud üleminekud. Narva asulaalade modelleerimisel võeti arvesse nelja tegurit: kõrgusmudel, kaugus teedest, kaugus veekogudest, kaugus aastal 1989 olemasolevast asustusest (lisa 7). Neljast tegurist kaks on staatilised ja kaks dünaamilised. Dünaamilisteks on kaugus teedest ning asustusest, mis arvutati uuritava perioodi jooksul nii asustuse kui ka teede kasvades ümber. Visuaalse vaatluse põhjal järeldati, et kahte üleminekut mõjutasid erinevad tegurid, seega jäeti üleminekud kaheks. Metsamaa muutumisel asulaks olid olulisteks teguriteks kaugus olemasolevast asustusest, kõrgusmudel ja kaugus veekogust. Põllu- ja rohumaa muutumisel asulaks olid olulisteks aga kaugus teedest, kaugus olemasolevast asustusest ja kaugus veekogudest.

Tabelis 21 on ära toodud iga teguri seosekordaja Crameri V väärtused. Antud juhul on näha, et kõigi tegurite väärtused on suuremad kui 0,15 ehk tegemist on üleminekute juures kasulike teguritega. Algselt kaasati tegurite hulka põllu- ja rohumaa muutumisel asulaks ka maakasutus, aga hilisemal modelleerimisel see eemaldati väikese mõju tõttu. Tegurite põhjal koostatud üleminekupotentsiaali kaartidel on metsamaast kõige tõenäolisemad muutuma just veekogude lähedased alad (lisa 8). Põllu- ja rohumaa muutumisel eristuvad olemasoleva asutusega piirnevad alad ning teede äärsed alad.

**Tabel 21.** Narva linna ja selle lähiümbruse asulaalade ülemineku tegurite Crameri V väärtused.

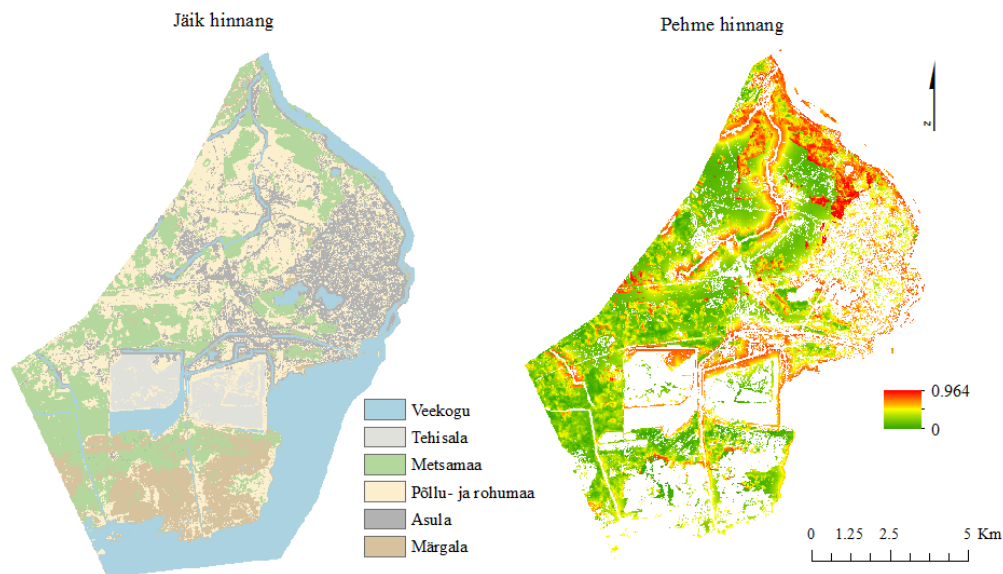
Tegurid	Crameri V
Kõrgusmudel	0.2448
Kaugus olemasolevast asustusest 1989	0.3222
Kaugus teedest	0.3391
Kaugus veekogudest	0.3487

Maakasutus muutuste üleminekutõenäosused perioodidel 1989–2007 ja 2007–2015 on toodud tabelis 22. Maatriks näitab et veekogu, metsamaa ja asula klassid on olnud stabiilsed, jäädes samasse maakasutusklass mõlemal vaatlusperioodil. Kõige vähem püsivad on olnud nii märgala kui ka põllu- ja rohumaa, mida näitab madal üleminekutõenäosus ning selle kõikumine vaadeldavatel perioodidel. Märgala eriti madal üleminekutõenäosus viimasel perioodil näitab selgelt märgala pikslite klassifitseerumist põllu- ja rohumaa ning metsamaa piksliteks.

**Tabel 22.** Narva linna ja selle lähiümbruse ülemineku tõenäosuste maatriks perioodideks 1989–2007 ja 2007–2015.

Maakasutus	Aasta	Veekogu	Tehisala	Metsamaa	Põllu- ja rohumaa	Asula	Märgala
Veekogu	1989–2007	<b>0.9928</b>	0.0002	0	0	0.0002	0.0068
	2007–2015	<b>0.8783</b>	0.0015	0.0095	0.0952	0.0084	0.0071
Tehisala	1989–2007	0.0027	<b>0.8576</b>	0	0.1397	0	0
	2007–2015	0.0014	<b>0.6629</b>	0.0107	0.301	0.0135	0.0105
Metsamaa	1989–2007	0.0007	0	<b>0.8599</b>	0.1306	0	0.0089
	2007–2015	0.0005	0.002	<b>0.7542</b>	0.1893	0.0201	0.0339
Põllu- ja rohumaa	1989–2007	0.0248	0.0164	0.1166	<b>0.6824</b>	0.0691	0.0906
	2007–2015	0.0024	0.0441	0.1631	<b>0.5134</b>	0.1768	0.1002
Asula	1989–2007	0	0	0	0.023	<b>0.977</b>	0
	2007–2015	0	0	0.0035	0.009	<b>0.9875</b>	0
Märgala	1989–2007	0.0023	0	0.0635	0.127	0	<b>0.8072</b>
	2007–2015	0.0682	0.0018	0.514	0.1476	0.0173	<b>0.2511</b>

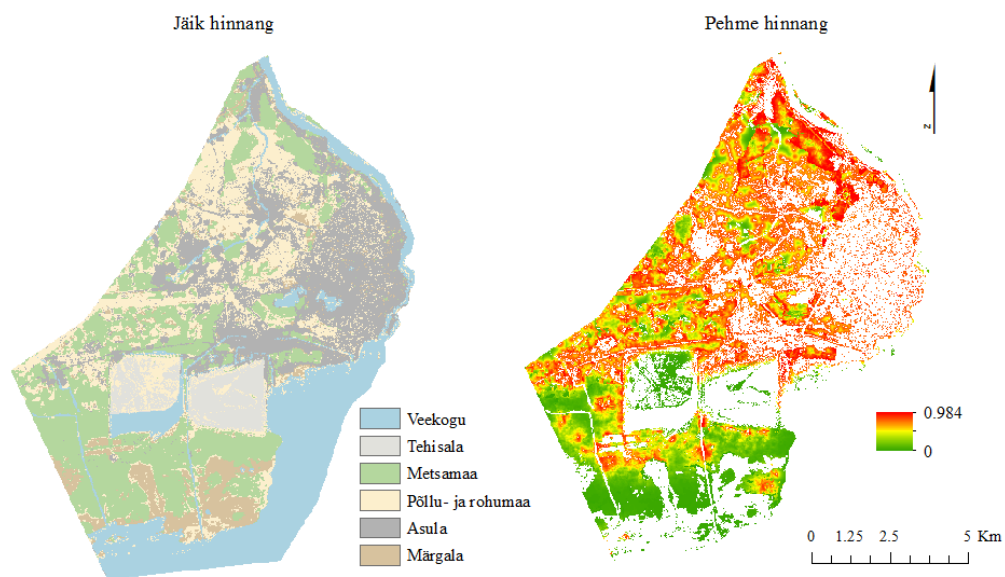
Esimene modelleerimine tehti aastaks 2015 ning joonisel 16 on ära toodud nii pehme kui ka jäik hinnang. Pehme prognoos näitab, et kõige suurem tõenäosus muutuseks oli jõeäärsetel aladel ning enim just Narva linna äärsetel aladel. Kõige väiksem muutuste tõenäosus oli metsastel aladel ning märgala ümbritsevatel aladel. Keskmiseks jäi tõenäosus teede ääres paiknevatel aladel.



**Joonis 16.** Narva linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2015.

2015. aasta modelleeritud jäiga hinnangu valideerimisel saadi kapa indeksiks 82,55%, üldiseks kapa indeksiks 84,74% ja asukoha kapa indeksiks 86%. Pehme hinnangu valideerimisel saadi täpsuseks 88%, mis on kõrgem soovitatud täpsuse väärtusest. Kõik saadud tulemused näitasid, et mudel on piisavalt „hea“, et teha samu tegureid kasutades modelleerimine aastaks 2030. Tegurid ei muutunud, aga nüüd kasutati kaugust 2007. aastal olemas olnud asutusest.

Joonisel 17 on ära toodud modelleeritud pehme ja jäik hinnang aastaks 2030. Pehmelt hinnangult on näha, et tõenäoliselt muutuvaid alasid on väga palju ning nende seast jäävad välja vaid märgala ja seda ümbritsevad alad. Kõige suurem tõenäosus muutumiseks on olemasoleva asutuse ümber olevatel aladel just pikki jõge. Jäiga hinnangu põhjal võib öelda, et 537 hektarit põllu- ja rohumaa ning 62 hektarit metsamaast muutuvad 2030. aastaks tõenäoliselt asulaalaks.



**Joonis 17.** Narva linna ja selle lähiümbruse pehme ja jäik hinnang aastaks 2030.

## 4 ARUTELU JA JÄRELDUSED

Maakasutusmuutuste ja valglinnastumise modelleerimised on olulised keskkonna ja ökoloogilise seisundi hindamiseks ning tuleviku maakasutusmuutuste paremaks mõistmiseks. Tulenevalt ehitusbuumist on kõigi Eesti suuremate linnade asulaalad laienenud, kuid see on toimunud väga erinevas mahu. Uute eramupiirkondade teke ning infrastruktuuri ümberplaneerimine on endaga kaasa toonud muutused loodusmaastikus, saastatuse kasvu, elupaikade hävimise ja viljakate põllumaade vähenemise (Tian *et al.* 2016, United Nations 2014, Tewolde, Cabral 2011). Ajaloolised maakasutusmustrid ning tuleviku prognoosid näitavad, et asulaalade kasv suureneb olemasoleva asutuse lähedal, mis lisab veelgi survet keskkonnale ning linnaplaneerijatele, et tagada linnade säästev areng.

Uurimisaladeks olid linnad ja nende linnalähipiirkonnad, seega suuremas osas koosnevad uurimisalad asulaalade pikslitest. Linnad on ümbritsetud põhiliselt põllu- ja rohumaaadest ning vähemal määral ka metsamaast. Tulemused näitavad, et kõige rohkem on kasvanud asulaalad ja kõige rohkem on vähenenud põllu- ja rohumaa. Sarnastele tulemustele jõudsid ka Tewolde ja Cabral (2011), kes leidsid, et Eritrea pealinnas Asmaras on asulaalade pindala peaaegu kolmekordistunud aastatel 1989–2009. Prieto-Amparán *et al.* (2016) leidsid, et perioodil 1989–2014 oli Mehhikos Chihuahua linnas ainsaks kasvavaks maakasutustüübiks asulaala.

Uute elamupiirkondade tekkeks on oluline vaba maa olemasolu ning selle hind. Muutused põllumajandussektoris peale taasiseseisvumist (Tammaru *et al.* 2009) jätsid paljud linnalähedased põllumaad kasutuseeta. Sellised alad muutusid ahvatlevateks uute elamupiirkondade arendajatele, sest ehitusbuumi ajal pandi neist paljud suhteliselt odava hinnaga müüki. Asulaalad laienevad eelisjärjekorras just linnalähedastele madala taimkattega aladele (Kirsimäe 2015), kus elamuehitus on arendajatele odavam. Metsaalade hoonestamine on toimunud vähesel määral, aga kõigi uurimisalade juures on seda siiski märgata. Enim on seda toimunud Tallinna rannikuäärsetes piirkondades, kus asuvad natuke kallimad uuselamupiirkonnad (Roose *et al.* 2013). Odava maa kinnisvaraturule tulek võib viia prognoosist kiirema kasvuni, kuid antud magistritöös toodud prognoosid annavad olulist informatsiooni elamuehituse planeerimiseks ning ülevaate tuleviku stsenaariumidest uuringualadel.

Asulaalade maakasutusmuutuste analüüs perioodil 1989–2016 näitas linnadevahelisi erinevusi. Esimesel vaadeldaval perioodil oli asulaalade kasvamine suurim kõigis teistes uuritavates

linnades välja arvatud Pärnu, kus suurem kasvamine leidis aset viimasel perioodil. Kõige suurem oli kasv Tallinnas, kus 72% uutest asulaaladest ehitati esimesel vaadeldaval perioodil. Tartu puhul ehitati esimesel perioodil ligikaudu 61% ning Narva linnalähipiirkondades on kasv mõlemal vaadeldaval perioodil jäänud 50% lähedale. Uuritavate linnade lähivaldade rahvaarvu statistikat vaadates selgub aga, et rahvaarvu tõus on lähivaldades jäänud pigem ehitusbuumi järgsele perioodile (Statistikaamet 2017). Antud magistritöös käsitletud nelja linna lähivaldade rahvastik hakkas kasvama alates 2005. aastast natuke kiiremini võrreldes eelnevate aastatega. Narvas hõlmas kasv vaid ühte aastat, kuid teistes linnades jätkus kasv kuni 2011. aastani. Seda võib seletada arendajate poolse ehitusega, kus piirkonnad esmalt hoonestatakse ning alles peale eramute valmimist leitakse neile omanikud. Tihti võib aga hoonetele omanike leidmine osutuda keeruliseks ja aeganõudvaks protsessiks. Uusarendatud elamupiirkondade elanikud sageli kas viivitavad oma tegeliku elukoha ümberregistreerimisega või ei teosta üldse sisseregistreerimist valda, kus nad tegelikult elavad, kindlustades nii näiteks lastele kooli- ja lasteaiakohad linnades või Tallinnas näiteks tasuta ühistranspordi võimaluse. Ehk siis linnade lähivaldade rahvastikuarvud ei pruugi peegeldada tegelikku rahvaarvu piirkonnas. Asulaalade kasv toimus põhiliselt põllu- ja rohumaa arvelt, seega sai osaliselt kinnitust esimene hüpotees ehk põllu- ja rohumaa osakaalu suur vähenemine kõigil vaadeldavatel perioodidel aga eelkõige perioodil 1989–2007. Pärnu puhul toimus suurem põllu- ja rohumaa vähenemine just teisel perioodil, kõigi teiste linnade puhul toimus see esimesel perioodil.

2030. aastaks tehtud prognoosi põhjal võib öelda, et kinnitust sai teine püstitatud hüpotees ehk olemasoleval asustusel on suur mõju asulaalade laienemisele. Prognoosist selgus, et kõige tõenäolisemalt tekivad uued asulaalad kõigi linnade puhul olemasoleva asutuse ning administratiivpiiri lähedastele aladele ning seda tõenäoliselt just majandusliku kasu tõttu (Roose, Gauk 2015). Tallinna ja Pärnu puhul on pika prognoosi juures kõige suurem tõenäosus muutumiseks just merelahe äärsetel aladel. Pärnu liivarand on kõigil vaadeldavatel perioodidel olnud ilma elamuhoonestuseta, aga 2006. aastal rajatud rannapromenaad mõjutab siinkohal tulemust. Seetõttu prognoosib mudel sinna suure tõenäosusega hoonestust. Teede mõju tuli välja Tartu puhul, kus pehme prognoosi kaartidel joonistusid selgelt välja teedeäärsed alad. Narva linnalähedased alad jaotusid pehme hinnangu põhjal põhiliselt kaheks- alad kus tõenäosus muutumiseks on väga suur ja alad, kus see praktiliselt puudub. Kõige ebatõenäolisemalt muutuvateks aladeks on suured metsamassiivid, tehis- ja märgalade äärsed alad ning teedevõrgust kaugel paiknevad piirkonnad. Jäiga hinnangu põhjal võib öelda, et jätkub eelisjärjekorras põllu- ja rohumaa hoonestamise trend. Metsamaa kasutamine asulaalade



laienemiseks toimub väga väikese mahus, aga kõigi linnalähipiirkondade juures on seda võimalik täheldada.

Modelleerimise edukuse ja täpsuse määravad ära nii kasutatavad alusandmed kui ka õigesti valitud tegurid. Antud magistritöö kasutati alusandmetena Landsati 30 meetrise resolutsiooniga satelliidipilte ning eelnevate uuringutega tuvastatud tegureid. Kasutatud Landsat satelliidipiltide puhul ei ole tegemist kõige parema resolutsiooniga piltidega, kuid maakasutusmuutuste uurimise jaoks omab Landsat piisavalt pikka aegrida. Alates 2015. aastast kättesaadavate 10 meetrise resolutsiooniga Sentinel-2 või teiste parema resolutsiooniga satelliidipiltide kasutamine ei oleks lühikese aegrea tõttu olnud siinkohal võimalik. Küll aga võib parema resolutsiooniga piltide kasutamine tulevikus anda väga häid ning täpsemaid tulemusi. Eestis asuvate erinevate alade kohta on lisaks satelliidipiltidele sarnastes uuringutes kasutatud nii erinevaid topokaarte kui ka Maa-ameti Corine andmeid (Roosaare 2009, Sisask 2008), kuid nendes uuringutes põrkuti nii standardiseerimisest, täpsusest kui ka väikesest aegreast tulenevate probleemidega, mida satelliidipildid võimaldavad vältida.

Satelliidipiltide klassifitseerimiseks on erinevates uuringutes kasutatud väga erinevaid tarkvarasid. Kõige populaarsemateks on ERDAS ning eCognition Developer (Tewolde, Cabral 2011, Prieto-Amparán *et al.* 2016, Yuan *et al.* 2005), mis mõlemad on tasulised programmid. Antud magistritöös viidi näidistega klassifitseerimine läbi programmiga ArcGIS. Võrreldes teiste uuringutega jäid klassifitseerimise täpsused samadele tasemetele, olles enamasti suuremad kui 85%, mida peetakse üldiselt minimaalseks soovitatavaks täpsuseks. Küll aga tekkis probleeme märgalade klassifitseerimisel, mida on oma töös käsitelnud natuke ka Yuan *et al.* (2005). Klassifitseerimise täpsusi vaadates on näha, et suuremas osas jäävad märgalade tootja ja kasutaja täpsused alla 85%, sest tulenevalt konkreetse uuringuaasta ilmastikuoludest klassifitseerusid nad põllu- ja rohumaa. Asulaalade laienemise uurimisel see suurt probleemi ei tekitanud, sest märgalad on aastate jooksul püsinud ilma hoonestuseta ning seetõttu mudelid sinna enamasti hoonestust ei prognoosinud. Kui aga hakata analüüsima ning modelleerima näiteks põllu- ja rohumaa muutumist aastate jooksul, tuleb antud probleemile rohkem tähelepanu pöörata. Märgalade klassifitseerumine erinevatel aastatel erinevasse maakasutusetüüpi sõltub ebaühtlastest sademetest ja temperatuurist (Yuan *et al.* 2005). Lisaks märgaladele tekitasid täpsuses vigu ka hõredalt hõivatud asulaalad, mis tekitasid segupiksleid. Segupikslike tekkepõhjuseks on asulaalade maakasutuse heterogeensus. Landsat piksli suuruseks on 30 meetrit ning asulaaladel on raske leida vastava suurusega vaid ühe maakasutustüübiga alasid (Erik 2013).

Mudeli kalibreerimine viidi läbi võttes aluseks maakasutusmuutusi perioodil 1989–2007. Seejärel valideeriti tulemus kasutades 2016. aasta tegeliku maakasutuse klassifitseeritud kaarti. Pika perioodi prognoosi tegemisel võeti aluseks maakasutusmuutused perioodil 2007–2016 sealjuures kasutades eelnevalt kindlaks tehtud tegureid. Teiseks võimaluseks, mida siinkohal ei kasutatud, oleks pika perioodi prognoosi tegemiseks võtta aluseks maakasutusmuutused perioodil 1989–2016. Perioodi 1989–2007 jääb ehitusbuumi aeg, mil toimus Eesti linnalähipiirkondades kiire asulaalade laienemine. Perioodil 2007–2016 toimus samuti asulaalade laienemine, aga vaadates maakasutusmuutuste analüüsi, tundub mõõdukamalt. Põhinedes Tartu 2035. aasta elamuprognoosil (Roose, Gauk 2015) võib öelda, et linnalähipiirkondade laienemine jätkub pigem mõõdukas tempos ning ehitusbuumile sarnast kiiret laienemist ei ole oodata. Samas puuduvad sarnased põhjalikud uuringud Eesti teiste suuremate linnade kohta- seega võib näiteks Tallinna puhul olla olukord teistsugune. Teiste väiksemate linnade asulaalade kasv jääb suure tõenäosusega aastani 2030 pigem mõõdukaks ning sarnaneb perioodil 2007–2016 toimunud laienemisega.

Modelleerimisel võeti aluseks põllu- ja rohumaa ning metsamaa üleminek asulaalaks. Üleminekupotentsiaali kaartide koostamiseks kasutati tulemuste täpsuse parandamiseks kõigi linnade puhul eri tegureid, sarnast lähenemist on soovitanud Sisas (2008) oma magistritöös. Tegemist on paiknemiselt väga erinevate linnadega. Tallinn ja Pärnu paiknevad rannikul ning mõlemad omavad mere mõju, samas Tartu ja Narva asuvad rannikust kaugel ning samade tegurite rakendamisel oleks tulemused ebatäpsed. Varem ettevalmistatud teguritest ei leidnud ühegi mudeli puhul kasutust ajaline kaugus kesklinnast. Kesklinnast ajalise kauguse mõju puudumist võib selgitada asjaoluga, et linnade administratiivpiirid omavad ebaühtlast kuju ja kaugust kesklinnast. Administratiivpiiri üks osa võib olla kesklinnast neli korda kaugemal kui teine, mistõttu avaldab mõju kaugus administratiivpiirist aga mitte kesklinnast.

Kõige enam leidsid teguritest kasutust kaugus teedest, veekogudest ja olemasolevast asutusest. Teedest olid olulised nii kõik suuremad teed, kui Pärnu puhul vaid põhiteed. Veekogude puhul eristusid selgelt rannikuäärsed linnad, kus kaugus merest oli olulisem, kui kaugus siseveekogudest. Antud linnade juures oli ranniku mõju olemas, aga tegemist ei olnud just kõige tugevama mõjuteguriga. Ehitusbuumi aegsete elamupiirkondade juures on arendajatele eriti oluline kasumlikkus aga ka eramute võimalik kiire müük, mistõttu eelistati ehitada just teede ja olemasoleva asutuse lähedale (Tammaru *et al.* 2009, Samarüütel *et al.* 2010). Olemasoleva taristu lähedale ehitamine oli arendajale odavam ning kerkinud eramute müük läks odava hinna tõttu kiiremini. Looduskaunitesse kohtadesse, nagu mere ja siseveekogude äärde, kerkinud

elamud olid kallimad (Roose *et al.* 2013) ja nende ehitamine ei olnud nii massiline ning seetõttu ei pruugi mere tegelikkuses eksisteeriv mõju visuaalse vaatluse korral eristuda. Linnalähipiirkondi eelistavad just noored pered, kes soovivad rohkem privaatsust ning ruumi, aga kellel ei ole võimalik kalleid, looduskaunites kohtades asuvaid elamuid soetada.

Mõjutegur kaugus administratiivpiirist leidis kasutus nii Tartu kui Pärnu puhul, kus linnalähialade asustus on koondunud suures osas tihedalt administratiivpiiri lähedale ning sellest kaugenedes järjest väheneb. Tallinna linnalähialade kasvamine on toimunud killustatuna, hõivates ennekõike just odavad teedeäärsed põllu- ja rohumaad. Nende alade seas on nii administratiivpiirile väga lähedasi, aga ka väga kaugeid piirkondi. Maakasutuse tegur leidis kasutus kõigi linnade puhul välja arvatud Narva, kus suurte metsamassiivide hulk uuringualas on väga väike ning asulaalade kasv on üldiselt olnud aeglane.

Kaasatavate tegurite poolest olid omavahel kõige sarnasemad Tallinn ja Pärnu- mõlema linna kasvamine on olnud väga killustunud, olles mõjutatud väga paljudest erinevatest teguritest. Tartu on seevastu kasvanud väga kompaktelt, kindlates suundades ja linna kasv on mõjutatud seega ka väiksemast tegurite hulgast. Kõige vähem tegureid mõjutas aga Narva asulaalade kasvu. Samas on Narva uuringualade seas ka see linn, kus visuaalne kasvamine oli kõige minimaalsem.

Modelleerimise täpsuse hindamisel saavutati kõigi mudelite puhul täpsus, mis võimaldas teha edasi pika perioodi prognoos. Jäiga hinnangu valideerimisel tuleb tähele panna, et antud uuringus modelleeriti vaid asulaalade laienemist ehk vaatluse alt jäeti välja kõik teised üleminekud. *VALIDATE* mooduli täpsuse hindamine võtab aga arvesse kõiki muutusi, kuid kuna enamik uuringualast koosnes asula pikslitest, siis otsustati seda siiski uuringusse kaasata. Samas tuleb meele pidada, et *VALIDATE* mooduli kaasamise tõttu on tulemused kindlasti madalamad. Jäiga hinnangu põhjal saadi kõige ebatäpsem tulemus Tartu kohta ning pehme hinnangu põhjal Pärnu kohta. Kõige täpsem oli aga jäiga hinnangu põhjal Tallinna ja pehme hinnangu põhjal Narva mudel. Tallinna puhul saadi täpne tulemuse olenemata mõjutatavate tegurite hulgast ning killustunud kasvust. Tulemused erinevad Henriquez *et al.* (2006) saadust, kus killustunult kasvanud linna mudel oli ebatäpsem, kui kompaktelt kasvanud linna oma. Antud uuringus oli Tartu kõige kompaktsemalt kasvanud, kuid antud mudel oli jäiga hinnangu poolest kõige ebatäpsem. Samas aga Tallinna puhul, mis on kasvanud väga killustunult, saadi väga täpne mudel. See lükkab ümber kolmanda püstitatud hüpoteesi, et modelleerimine on täpsem kompaktelt kasvanud linnade puhul, kus tõukejõude on vähe.

Kuigi antud magistritöös saadi linnade ja linnalähipiirkondade asulaalade kasvu kohta edasise prognoosi tegemiseks piisavalt täpsed mudelid, on veel erinevaid võimalusi mudeli väljundite parandamiseks. Suurema hulga erinevate muutujate, nagu sotsiaalmajanduslike ja keskkonna tegurite, kaasamine võib oluliselt muuta saadavat tulemust. Lisaks, kui võtta vaatluse alla vaid linna lähivallad, tuleks tulevikus uuringualade seast eemaldada kõik administratiivpiiridesse jäävad pikslid, sest saadud tulemust mõjutavad ka linnasisesed muutused.

# KOKKUVÕTE

Ajaloolise ja tänapäevase linnade kasvu analüüs ning tuleviku asulaalade laienemise modelleerimine on olulised meetodid linnade kasvumustrite mõistmiseks ning säästva arengu tagamiseks. Antud uuring viidi läbi, et kindlaks teha, analüüsida ja modelleerida Eesti nelja suurima linna maakasutusmuutusi, kasutades kaugseire andmeid perioodist 1989–2016. Kasutati Landsat TM ja OLI-TIRS satelliidipilte aastatest 1989, 2007 ning 2016. Klassifitseerimiseks kasutati näidistega klassifitseerimist ja kõigi kaartide puhul saavutati edasiseks tööks piisav täpsus. Maakasutusmuutuste analüüsiks ning tuleviku prognoosi modelleerimiseks kasutati programmi IDRISI moodulit *LCM*.

Maakasutusmuutuste analüüsist selgus, et suurimad muutuse on läbi teinud põllu- ja rohumaa, mis on muutunud nii asulaalaks kui ka vähemal määral metsamaaks. Lisaks on metsamaa muutunud asulaalaks ning väikesed muutused on läbi teinud nii tehis- kui ka märgalad. Asulaalade laienemine on toimunud pikki suuremaid teid ning olemasoleva asustuse ja administratiivpiiri lähedastel aladel. Uuringualade kogupindala suhtes suurenesid enim Tallinna asulaalad kasvades 11,9% ning kõige vähem Narva asulaalad suurenedes vaid 8,26%. Eesti linnalähipiirkonnad tegid suurima kasvamise läbi ehitusbumi aastatel, mis jääb antud uuringus esimesse vaadeldavasse perioodi 1989–2007. Minimaalsed nõuded arendajatele ehitusbumi ajal viisid paljude linnade puhul killustunud kasvamiseni, mis omakorda on tekitanud erinevaid probleeme näiteks infrastruktuuri arendamisel.

Tuginedes ajaloolisele maakasutusmuutusele tehti esmane ennustus aastaks 2016 ning peale piisava täpsuse saavutamist mudeli valideerimisel tehti ennustus aastaks 2030. Esimese ennustuse aluseks olid 1989. ja 2007. aasta kaardid ning sellega tehti kindlaks maakasutusmuutust mõjutavad tegurid. Pikk ennustus tehti 2007. ja 2016. aasta kaartide põhjal, kuid kasutades valideeritud mudeli tegureid. Erinevate linnade puhul leidsid kasutust erinevad tegurite komplektid. Teguritest kasutati mudeli koostamisel kõrgusmudelit, maakasutust, kaugust teedest, kaugust põhiteedest, kaugust siseveekogudest, kaugust merest, kaugust olemasolevast asustusest ja kaugust administratiivpiirist.

Prognoosi tulemused näitavad, et järgmisel 14 aastal kõik neli linna jätkavad oma kasvamist sarnaselt ajaloolisele laienemisele. Linnade laienemine leiab kõige tõenäolisemalt aset juba olemasoleva asutuse lähedal, mis võib tähendada edasist väga killustunud linnade kasvu. Suurimad muutused teevad läbi linnalähipiirkondades asuvad põllu- ja rohumaad, mis kõige

tõenäolisemalt on muutumas asulaaladeks. Kõige vähem tõenäolisemalt on asulaaladeks muutuma tehis- ja märgalad, mis uuringuperioodi jooksul küll tegid läbi muutusi kuid mitte asulaalaks. Metsamaa muutumine asulaalaks omab keskmist tõenäosust, kuid suurte metsamassiivide muutumine asulaalaks on väga ebatõenäoline.

Kaugseire andmeid on võimalik efektiivselt kasutada maakasutusmuutuste analüüsiks ning nad omavad piisavat teavet tuleviku prognooside koostamiseks. Samas tuleb silmas pidada satelliidipiltide klassifitseerimise täpsust, sest see määrab ära maakasutusmuutuste modelleerimise edukuse. Mudelites kasutatud ruumiliste tegurite abil tehti kindlaks asulaalade laienemiseks sobivad piirkonnad. Maakasutusmuutuste detailsemaks kirjeldamiseks ning modelleerimiseks tuleks tulevikus mudelitesse kaasata nii sotsiaalmajanduslikud kui ka keskkonnategurid. Antud uurimistöö annab olulist informatsiooni otsuste tegemiseks linnaplaneerijatele ja kohalikele omavalitsustele, et tagada linnade säästev areng ning asulaalade efektiivsem planeerimine.

## **Land cover changes analysis and modelling for 2030 in Estonia's four largest cities**

Piia Kirsimäe

### **Summary**

Measuring past and present urban growth and modelling future urban growth is essential for understanding its patterns and enabling sustainable development in the future. This study was performed to detect, analyse ja model the urban growth in four largest Estonian cities using remote sensing data from 1989 to 2016. This study used Landsat TM and OLI-TIRS satellite images from years 1989, 2007 and 2016. Classification was performed using supervised classification and reached overall accuracy that enabled to perform the modelling. Land cover change analyses and modelling was performed using program IDRISI extension *LCM*.

Land cover change analyses showed that the most significant changes are the transitions from agriculture and grass to urban and little bit less to forest. Additionally, forest has transitioned to urban and smaller changes have occurred in artificial areas and wetlands. Urban growth has mostly occurred along bigger roads, near pre-existing urban areas and close to cities administrative borders. The most significant was the change in Tallinn where urban areas grew 11,9% and Narva had the least amount of growth only 8,26%. Because of the construction boom Estonian suburban areas experienced rapid urban area growth in the first study period from 1989-2007. Minimal requirements for developers during construction boom led to fragmented growth of many cities what causes different problems for example in infrastructure development.

First prediction was made for the year 2016 based on the historical land cover change analysis and the second prediction was made for the year 2030, but only after model validation reached adequate accuracy. First prediction was based on the land cover maps from the years 1989 and 2007 and with that the driving forces were determined. The second prediction was based on maps from the years 2007 and 2016, but for the modelling the same driving forces was used that were determined previously. For different cities, different sets of driving forces were used. Driving forces that were included in the modeling were land use, distance from roads, distance from main roads, distance from inland waters, distance from sea, distance from pre-existing urban areas and distance from city administrative border.

The simulation results showed that urban growth is likely to increase in all four cities during the next 14 years in a similar manner to past growth. The cities are likely to expand near the current growth areas, which may result in complex and fragmented patterns of urban growth in these cities. Agriculture and grass are the most likely land cover class for conversion into urban areas. Least likely to convert are artificial areas and wetland, they went through some changes but not to urban areas. Forest land cover class has medium probability for conversion into urban class.

Remote sensing data can be effectively used to model dynamic land-cover changes and it provides the required information to sufficiently predict future changes. Also, you should remember that accurate classification of satellite imagery is essential for land cover change modelling. Used spatial factors determined the neighbourhood suitability for urban growth. Incorporating other variables, such as socio-economic and environmental factors, could improve model prediction for a more detailed interpretation of the future patterns of urban land cover changes. This study provides essential information to support the urban planners and local authorities to ensure sustainable urban development and more efficient urban planning.



## **TÄNUAVALDUSED**

Täna oma juhendajat Evelyn Uuemaad, kelle abi ja asjakohas nõuta poleks see töö valminud.  
Lisaks tahan tänada oma perekonda, kes aitasid nii vormistusliku poole pealt kui ka hea nõuga.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Aaviksoo, K., 1993. Application of Markov Models in Investigation of Vegetation and Land Use Dynamics in Estonian Mire Landscapes. Tartu.
2. Brown, D., G., Walker, R., Manson, S., Seto, K., 2004. Modeling Land-Use and Land-Cover Change. Land Change Science: Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface. New York: Springer, 395–409.
3. Eastman, R., J., 2012. IDRISI Selva Tutorial. Manual Version 17.
4. Erik, K., 2013. Ida-Virumaa linnades toimunud muutused spektraalse segu lahutamise meetodil. Magistritöö. Tartu.
5. Godoy, M., Soares-Filho, B., S., 2008. Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighbourhood, Belo Horizonte, Brazil. Modelling Environmental Dynamics, pp 319–338.
6. Haykin, S., 1999. Neural Network A Comprehensive Foundation. Second Edition. Pearson Education.
7. Henriquez, C., Azocar, G., Romero, H., 2006. Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. Habitat International 30:945–964.
8. Khoi, D., D., Murayama, Y., 2011. Modeling deforestation using a neural network-Markov model. Spatial analysis and modeling in geographical transformation process. GeoJournal Library 100:169–190.
9. Kirsimäe, P., 2015. Eesti maakonnakeskuste kasvamise suunad ja põhjused ajalooliste kaartide põhjal. Tartu.
10. Kährik, A., Tammaru, T., 2008. Population Composition in New Suburban Settlements of the Tallinn Metropolitan Area. Urban Studies, 45:1055-1078.
11. Narusk, K., 2014. Maastikumustri indikaatorite tundlikkus satelliidipiltide rasterandmestiku töötlustehnikate suhtes. Tartu.
12. Palang, H., 1998. Landscape changes in Estonia: the past and the future. Tartu.
13. Perez-Vega, A., Mas, J.-F., Ligmann-Zielinska, A., 2012. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. Environmental Modelling and Software, 29:11–23.

14. Peterson, U., Aunap, R., 1998. Changes in agricultural land use in Estonia in the 1990s detected with multitemporal Landsat MSS imagery. *Landscape and Urban Planning* 41:193–201.
15. Pontius, R., G., Malanson, J., 2007. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science* 19:2.
16. Poska, A., Sepp, E., Veski, S., Koppel, K., 2007. Using quantitative pollen-based land-cover estimations and a spatial CA\_Markov model to reconstruct the development of cultural landscape at Rõuge, South Estonia. *Vegetation History and Archaeobotany* 17:527–541.
17. Prieto-Amparán, J., A., Pinedo-Alvarez, A., Villarreal-Guerrero, F., Pinedo-Alvarez, C., Morales-Nieto, C., Manjarrez-Dominguez, C., 2016. Past and Future Spatial Growth Dynamics of Chihuahua City, Mexico: Pressures for Land Use. *International Journal of Geo-Information* 5(12).
18. Remm, K., Remm, J., Kaasik, A., 2012. Ruumiliste loodusandmete statistiline analüüs. Tartu ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituut.
19. Roose, A., Gauk, M., 2015. Tartu elamuproгноos 2035. Tartu linna üldplaneeringu koostamisel elamumaade määratlemiseks vajalike alusandmete väljatöötamine. Rakendusuuring. Tellija: Tartu Linnavalitsus, Linnaplaneerimise ja maakorralduse osakond.
20. Roose, A., Kull, A., Gauk, M., Tali, T., 2013. Land use policy shocks in the post-communist urban fringe: A case study of Estonia. *Land Use Policy*. 30:76–83.
21. Rosa, I., D., Ahmed, S., E., Ewers, R., M., 2014. The transparency, reliability and utility of tropical rainforest land-use and land-cover change models. *Global Change Biology* 20: 1707–1722.
22. Samarüütel, A., Selvig, S., S., Holt-Jensen, A., 2010. Urban sprawl and suburban development around Pärnu and Tallinn, Estonia. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 64:152–161.
23. Sepp, E., 2002. Rakk-automaat, Markovi ahelad ja maakasutuse modelleerimine. Keskastme uurimustöö. Tartu.
24. Sepp, E., 2004. Ajaloolise maakasutuse rekonstrueerimine Rõuge Tõugjärve uurimisalal. Bakalaureusetöö. Tartu.
25. Sisas, E., 2008. Maakasutuse muutused Eestis aastatel 1900–2000 ja prognoos aastaks 2050. Tartu.

26. Tammaru, T., Leetmaa, K., Silm, S., Ahas, R., 2009 Temporal and Spatial Dynamics of the New Residential Areas around Tallinn. *European Planning Studies*, 17:3, 423–439.
27. Tewolde, M. G., Cabral, P., 2011. Urban Sprawl Analysis and modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing* ISSN 2072–4292.
28. Tian, G., Ma, B., Xu, X., Liu, X., Xu, L., Liu, X., Xiao, L., Kong, L., 2016. Simulation of urban expansion and encroachment using cellular automata and multi-agent system model—A case study of Tianjin metropolitan region, China. *Ecological Indicators* 70: 439–450.
29. Tian, G., Wu, J., 2015. Comparing urbanization patterns in Guangzhou of China and Phoenix of the USA: The influences of roads and rivers. *Ecological Indicators*. 52:23–30.
30. United Nations, 2014. World Urbanization Prospects, Revision 2014. United Nations.
31. Veldkamp, A., Lambin, E., F., 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85:1–6.
32. Yuan, F., Sawaya, K., E., Loeffelholz, B., C., Bauer, M., E., 2005. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 98:317–328.

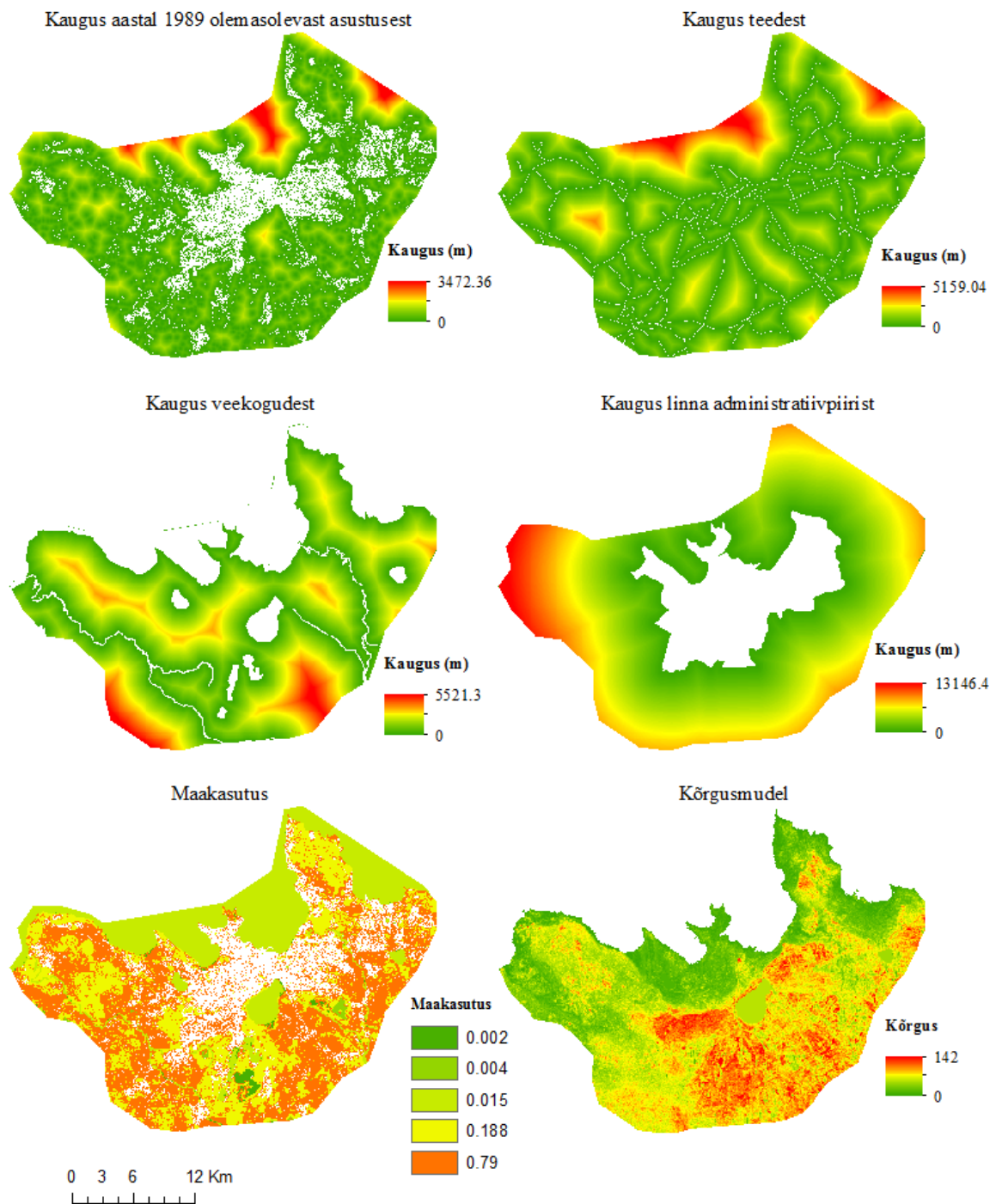
## **Interneti allikad**

1. Clarks Labs, 2015. <https://clarklabs.org/terrset/land-change-modeler/> viimati vaadatud 20.04.2017
2. Earth Explorer, 2017. USGS science for a changing world. <https://earthexplorer.usgs.gov/> viimati vaadatud 12.05.2017
3. GloVis, 2017. USGS science for a changing world. <http://glovis.usgs.gov/next/> viimati vaadatud 20.04.2017
4. Maa-amet, 2017a. Kinnisvara hinnaindeksid 2017. aasta I kvartalis. [https://www.maaamet.ee/sites/default/files/content-editors/kinnisvara/kinnisvara\\_hinnaindeksid\\_2017\\_i\\_kv.pdf](https://www.maaamet.ee/sites/default/files/content-editors/kinnisvara/kinnisvara_hinnaindeksid_2017_i_kv.pdf) viimati vaadatud 14.05.2017
5. Maa-amet, 2017b. Maa-ameti geoportaal. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/> viimati vaadatud 12.05.2017
6. Roosaare, J., 2009. [http://www.geo.ut.ee/roosaare/Roosaare\\_LCM\\_2009.pdf](http://www.geo.ut.ee/roosaare/Roosaare_LCM_2009.pdf) viimati vaadatud 20.04.2017

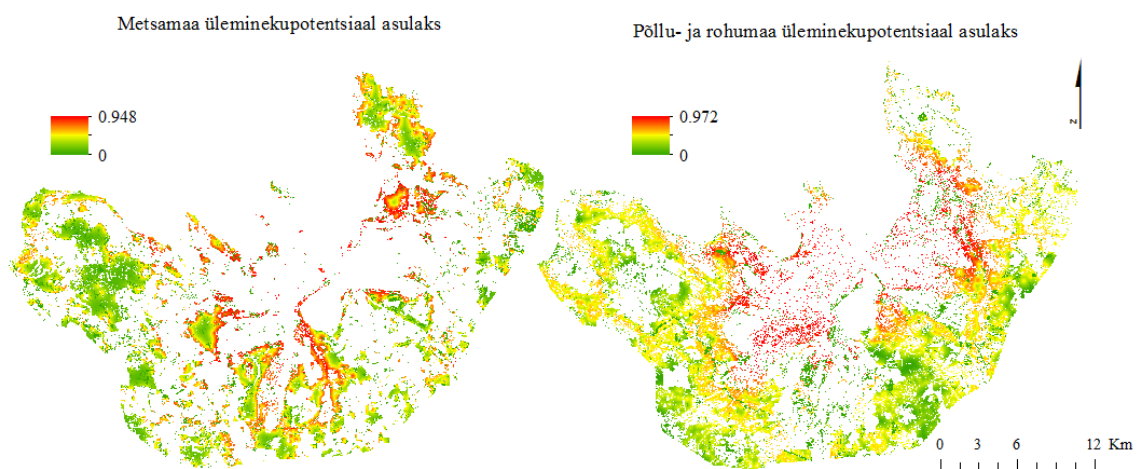
7. Statistikaamet, 2017. Rahvaarv, pindala ja asustustihedus haldusüksuse või asustusüksuse liigi järgi, 1. jaanuar. [http://pub.stat.ee/px-web.2001/Dialog/varval.asp?ma=Rv0291&ti=RAHVAARV%2C+PINDALA+JA+ASUSTUSTIHEDUS+HALDUS%DCKSUSE+V%D5I+ASUSTUS%DCKSUSE+LIIGI+J%C4RGI%2C+1%2E+JAANUAR&path=../Database/Rahvastik/01Rahvastikunaitajad ja koosseis/04Rahvaarv ja rahvastiku koosseis/&lang=2](http://pub.stat.ee/px-web.2001/Dialog/varval.asp?ma=Rv0291&ti=RAHVAARV%2C+PINDALA+JA+ASUSTUSTIHEDUS+HALDUS%DCKSUSE+V%D5I+ASUSTUS%DCKSUSE+LIIGI+J%C4RGI%2C+1%2E+JAANUAR&path=../Database/Rahvastik/01Rahvastikunaitajad+ja+koosseis/04Rahvaarv+ja+rahvastiku+koosseis/&lang=2) viimati vaadatud 21.05.2017
8. TerrSet, 2016. TerrSet. Geospatial Monitoring and Modeling System. [http://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2\\_Brochure\\_WEB.pdf](http://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2_Brochure_WEB.pdf) viimati vaadatud 20.04.2017

# LISAD

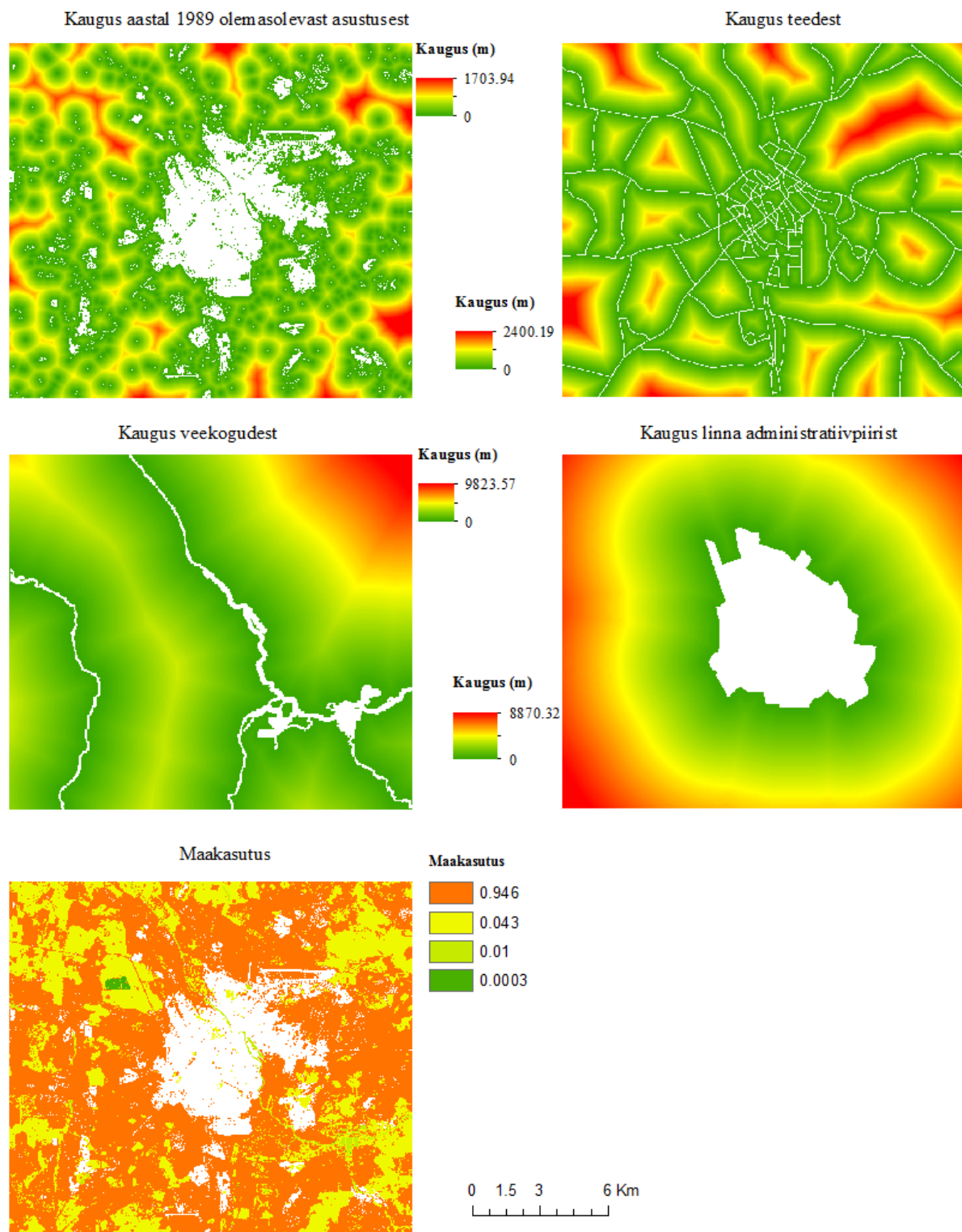
Lisa 1. Tallinna linna ja lähikümbruse modelleerimisel kasutatud tegurite kaardid.



Lisa 2. Tallinna linna ja selle lähiümbruse metsamaa ning põllu- ja rohumaa asulaks üleminekupotentsiaali kaardid.

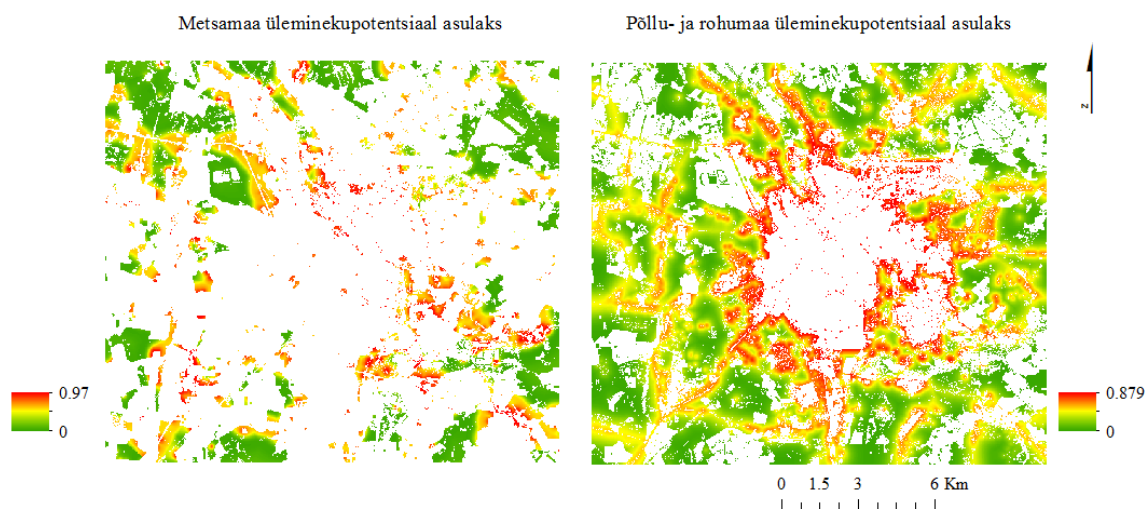


Lisa 3. Tartu linna ja lähiümbruse modelleerimisel kasutatud tegurite kaardid.

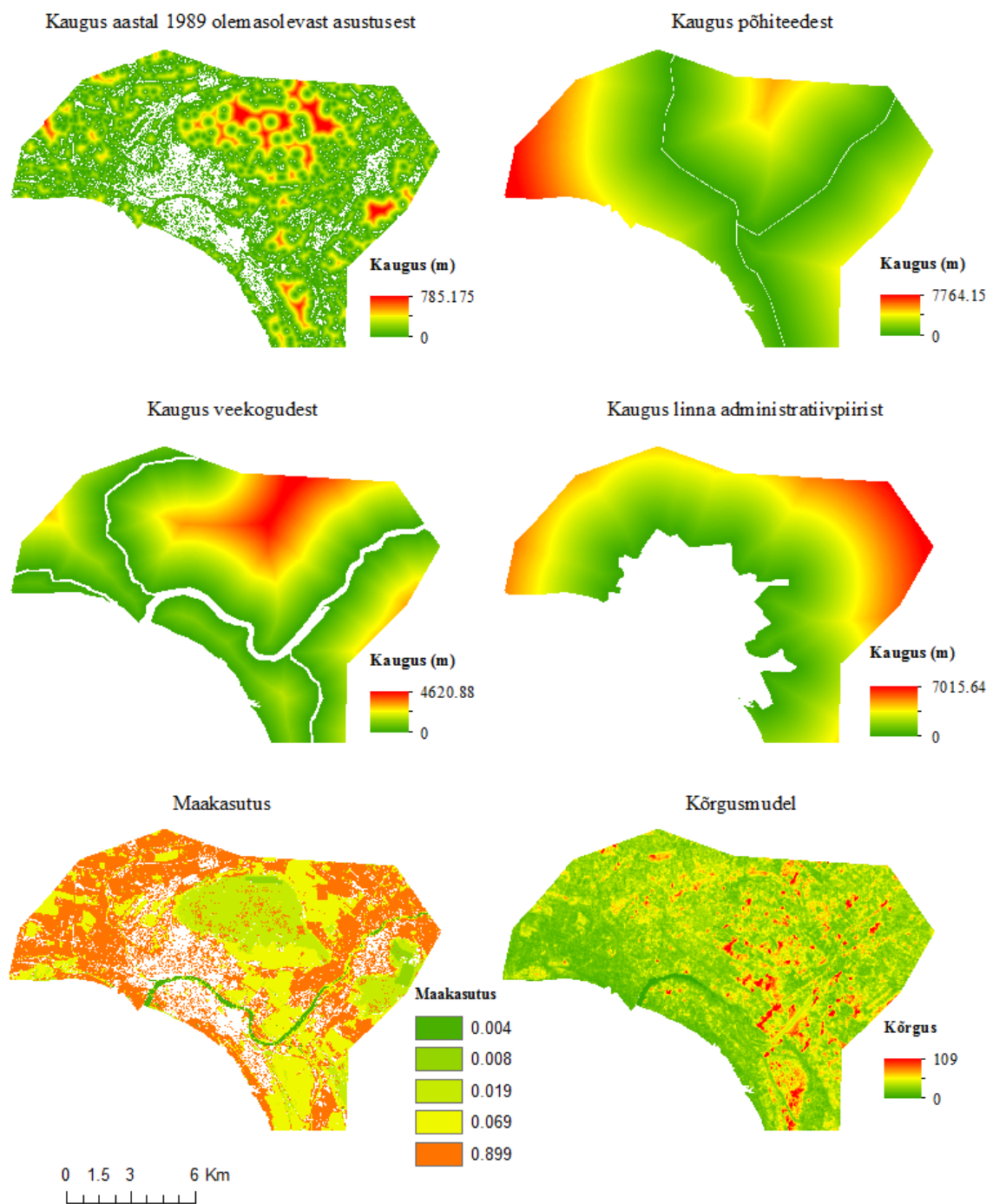




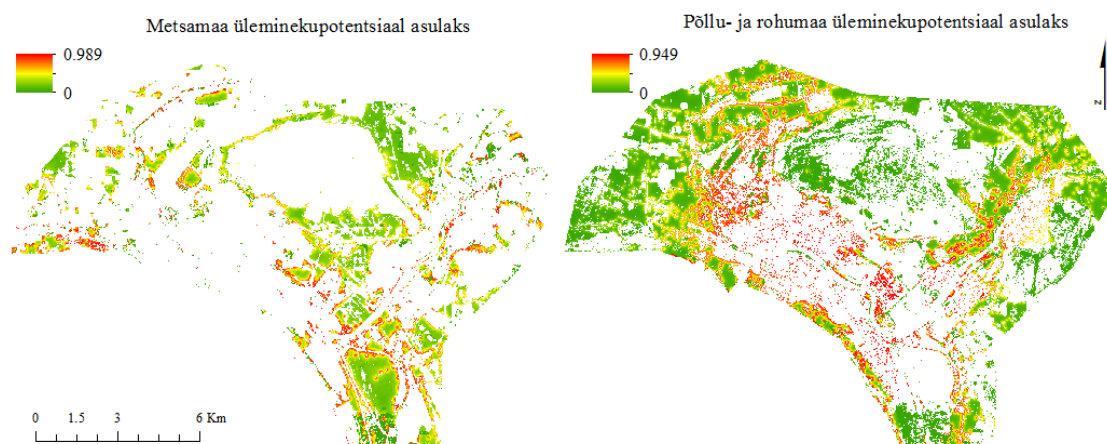
Lisa 4. Tartu linna ja selle lähiümbruse metsamaa ning põllu- ja rohumaa asulaks muutumise üleminekupotentsiaali kaardid.



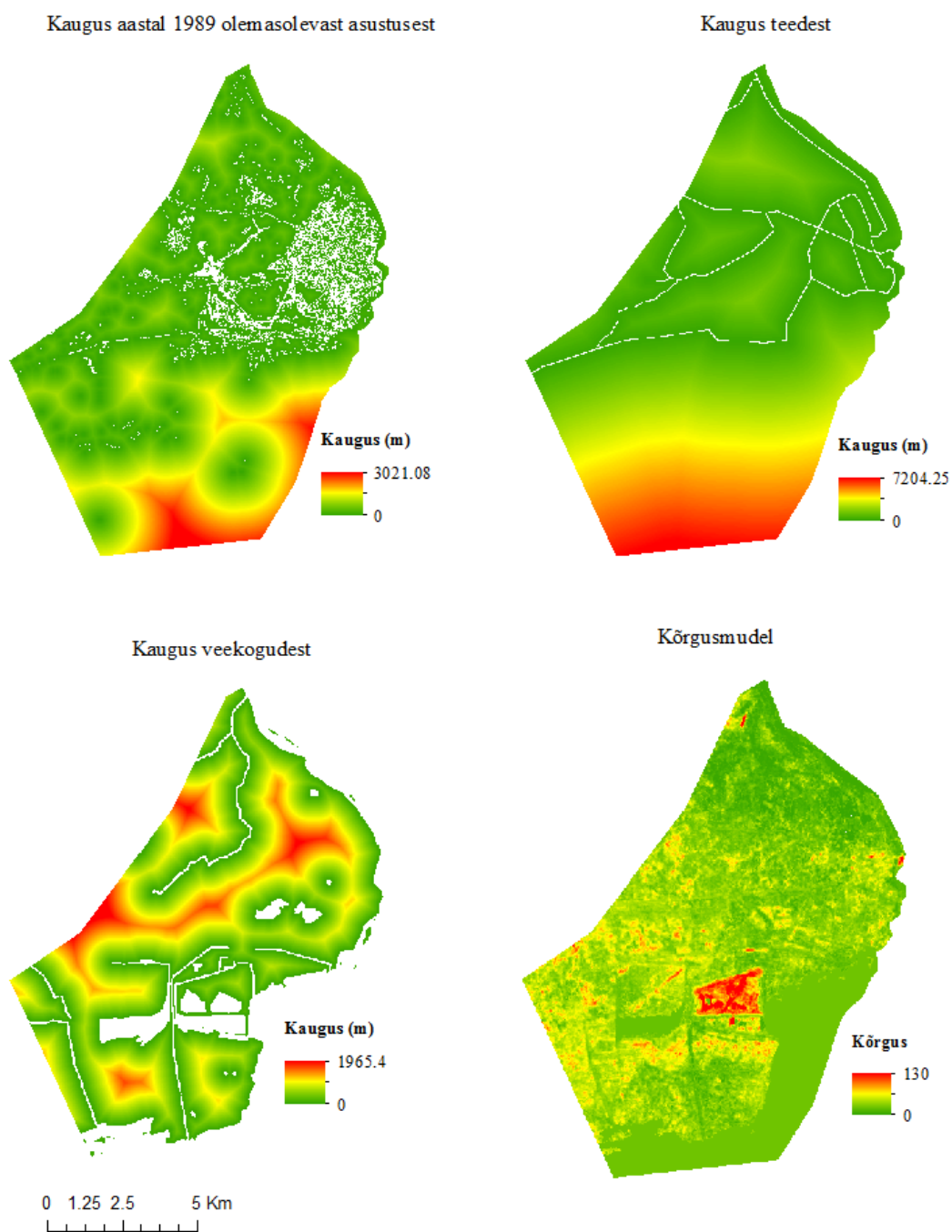
Lisa 5. Pärnu linna ja lähiümbruse modelleerimisel kasutatud tegurite kaardid.



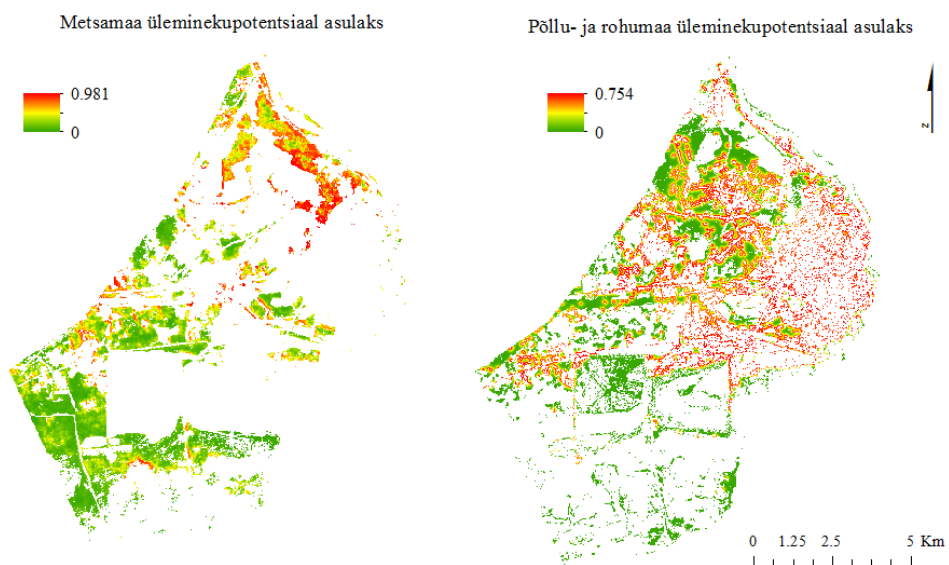
Lisa 6. Pärnu linna ja selle lähiümbruse metsamaa ning põllu- ja rohumaa asulaks üleminekupotentsiaali kaardid.



Lisa 7. Narva linna ja lähiümbruse modelleerimisel kasutatud tegurite kaardid.



Lisa 8. Narva linna ja selle lähiümbruse metsamaa ning põllu- ja rohumaa asulaks üleminekupotentsiaali kaardid.



## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Piia Kirismäe

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Eesti nelja suurima linna maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine aastaks 2030“

mille juhendaja on Evelyn Uemaa,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **25.05.2017**